

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

# HYDRODYNAMICKÁ SEPARACE SEDIMENTU VODNÍHO TOKU

HYDRODYNAMIC SEPARATION WATER FLOW SEDIMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PAVEL SAJNER

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. ZDENĚK NĚMEC, CSc.

BRNO 2009



## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problémem zanášení vodních nádrží a rybníků nadbytečným množstvím sedimentů, které se do vodního systému dostávají erozí. Popisuje metody těžby rybníčního bahna. Dále obsahuje měření odvoditelnosti sedimentů na hydrocyklonech a návrh laboratorní hydrocyklonové a filtrační jednotky. V závěru je uveden návrh technologie strojního odvodnění sedimentů, které byly vytěženy pomocí mokré metody sacím bagrem. Při návrhu bylo použito numerické simulace proudění v hydrocyklonech pomocí programu CFX a odvodňovací technologie je simulována v programu CHEMCAD.

## **Abstract**

The dissertation deals with clogging of reservoirs and ponds by redundant sediments which penetrate water system by erosion. It describes methods of extracting pond sediments. It contains measurement of dewatering of sediments on hydrocyclone and design of laboratory hydrocyclone and filter unit. In the conclusion there is design of technology of dewatering sediments which were extracted by wet method by drainage excavator. Numerical simulation of flowing in hydrocyclones is simulated in the CFX programme and dewatering technology is simulated in the CHEMCAD programme.

## **Klíčová slova**

Sedimenty

Odvodnění

Hydrocyklon

Hydrodynamická separace

Rybniční bahno

Odstředivka

## **Keywords**

Sediments

Dewatering

Hydrocyclone

Hydrodynamic separation

Pond sediment

Centrifuge

## **Bibliografická citace**

SAJNER, P. *Hydrodynamická separace sedimentu vodního toku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 77 s. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Němec, CSc.

## **Prohlášení o původnosti**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně, 31. 5. 2009

.....  
(podpis)

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při řešení diplomové práce. Chtěl bych poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Němcovi, CSc., vedoucímu diplomové práce, za cenné rady a návrhy. Za pomoc při řešení numerické simulace bych chtěl poděkovat panu Ing. Richardu Nekvasilovi, Ph.D. Zvláštní poděkování patří panu a Ing. Václavovi Vojtěchovi za poskytnutí klíčových informací.

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Problematika sedimentů ve vodních nádržích .....</b>	<b>12</b>
2.1 Vznik a vlastnosti sedimentů .....	12
2.2 Stav rybníčního bahna v ČR .....	14
2.3 Metody odstraňování sedimentů .....	15
2.3.1 Suchá metoda .....	16
2.3.2 Mokrý metoda .....	17
2.4 Způsoby využití těženého sedimentu .....	20
2.5 Legislativní požadavky pro nakládání s rybníčními sedimenty .....	21
2.5.1 Příčiny schválení zákona č. 9/2009 .....	22
2.5.2 Schválené změny a povinnosti z nich vyplývající .....	22
<b>3 Měření odvoditelnosti vybraných sedimentů .....</b>	<b>27</b>
3.1 Měření fyzikálních vlastností sedimentů .....	28
3.1.1 Měření hustoty .....	28
3.1.2 Měření viskozity .....	29
3.1.3 Stanovení času kapilárního sání a vhodného poměru přidávaných flokulantů .....	30
3.2 Zjištění granulometrického složení .....	35
3.4 Zkouška odvoditelnosti na laboratorním hydrocyklonu .....	37
<b>4 Návrh laboratorní odstředivé a filtrační jednotky .....</b>	<b>41</b>
4.1 Laboratorní hydrocyklonová jednotka .....	41
4.1.1 Konfigurace laboratorní hydrocyklonové jednotky .....	41
4.2 Laboratorní filtrační jednotka .....	43
4.2.1 Konfigurace laboratorní filtrační jednotky .....	45
<b>5 Návrh technologie pro strojní odvodnění vytěženého sedimentu .....</b>	<b>47</b>
5.1 Obecný návrh .....	47
5.2 Klíčové uzly navrhované technologie .....	48
5.2.1 Dekantační odstředivka .....	50
5.2.2 Hydrocyklon .....	54
5.3 Provedení zkušební numerické simulace proudění v hydrocyklonu .....	65
5.3.1. Geometrie zkoumaného hydrocyklonu .....	65
5.3.2. Vlastnosti média a částic .....	66
5.3.3 Výsledky numerických simulací a jejich zhodnocení .....	68
5.4 Simulace navrhované technologie v programu ChemCAD .....	71
<b>6 Závěr .....</b>	<b>75</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>76</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>78</b>



## Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
<b>a</b>	Pokusně stanovený koeficient	-
<b>AOX</b>	Absorbovatelné organické halogeny	-
<b>BTEX</b>	Monocyklické aromatické uhlovodíky nehalogenové (suma benzenu, toluenu, etylbenzenu a xylenu)	-
<b>c</b>	Výsledná rychlost pohybu	m/s
<b>CST</b>	Čas kapilárního sání	s
<b>d</b>	Průměr částic	m
<b>D</b>	Průměr válcovité části hydrocykonu	m
<b>d<sub>m</sub></b>	Velikost částice	m
<b>d<sub>vst</sub></b>	Průměr vstupní trysky	m
<b>d<sub>p</sub></b>	Průměr přepadové trysky	m
<b>F<sub>C</sub></b>	Corielisova síla	N
<b>F<sub>o</sub></b>	Odstředivá síla	N
<b>F<sub>ov</sub></b>	Vztlaková síla	N
<b>F<sub>r</sub></b>	Radiální složka odporové síly	N
<b>F<sub>sr</sub></b>	Radiální složka setrvačné síly	N
<b>G</b>	Poměr zrychlení	-
<b>m</b>	Hmotnost všech částic v suspenzi	g
<b>m<sub>s</sub></b>	Hmotnost suspenze	g
<b>m<sub>z</sub></b>	Hmotnost pevných částic, zadržených filtrem	g
<b>PAH</b>	Rezidua pesticidů	-
<b>PAU</b>	Polycyklické aromatické uhlovodíky (suma anthracenu, benzo(a)anthracenu, benzo(b)fluoranthenu, benzo(k))	-
<b>PCB</b>	Aromatické uhlovodíky halogenové	-
<b>r</b>	Poloměrem kroužení	m
<b>r</b>	Vzdálenost částice od středu rotace	m
<b>r<sub>o</sub></b>	Poloměr rozhraní	m
<b>S<sub>o</sub></b>	Usazovací plocha	m <sup>2</sup>
<b>t<sub>z</sub></b>	Doba, po kterou zrychlení působí	m/s
<b>u</b>	Usazovací rychlost	m/s
<b>u<sub>H</sub></b>	Charakteristická rychlost	m/s

$u_{\varphi}$	Tangenciální složka rychlosti	m/s
$u_{\varphi}$	Tangenciální složka rychlosti	m/s
$u_r$	Radiální složka rychlosti	m/s
$u_{r0}$	Radiální složka rychlosti způsobená odstředivou silou	m/s
$u_o$	Filtrační rychlost	m/s
$v$	Usazovací rychlost	m/s
$v$	Objem filtrátu na jednotkovou filtrační plochu	m <sup>3</sup>
$V_1$	Objem kapaliny, která se vyčistí za 1 sekundu	m <sup>3</sup>
$V_p$	Objem piktometru	l
$V_{stř}$	Objem suspenze zpracovaný za jednotku času	m <sup>3</sup>
$V_z$	Charakteristická výkonnost hydrocyklonu	l/min
$w$	Vertikální složka rychlosti	m/s
$x_v$	Objemová koncentrace	% obj.
$\alpha$	Úhel, který svírá směr proudění kapaliny s poloměrem kroužení	°
$\alpha_o$	Odstředivé zrychlení	m/s <sup>2</sup>
$\eta$	Výtěžek filtrace	-
$\eta_s$	Viskozita suspenze	Pa.s
$\eta_k$	Viskozita kapalné fáze	Pa.s
$\omega$	Úhlová rychlost rotující částice	rad/s
$\rho$	Hustota pracovního média	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Hustota suspenze	g/l
$\rho_u$	Hustota suspenze	g/l
$\rho_t$	Hustota pevné částice	kg/m <sup>3</sup>
$\rho^k$	Měrná hmotnost částic kalu	kg/m <sup>3</sup>
$\rho^v$	Měrná hmotnost vody	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta p$	Ztráta tlaku v hydrocyklonu	atm
$\Delta p_z$	Rozdíl tlaků	Pa
$\varepsilon$	Úhlové zrychlení	rad/s <sup>2</sup>
$\mu$	Dynamická viskozita vody	Pa.s
$\xi_o$	Odporový součinitel	-
$\varphi$	Vrcholový úhel kónické části hydrocyklonu	°
$\gamma$	Měrná váha suspenze	g/cm <sup>3</sup>

## 1 Úvod

Půda je jednou z nejzákladnějších složek životního prostředí. Stav, v jakém se nachází, významně ovlivňuje kvalitu podzemních a povrchových vod, obsah skleníkových plynů v atmosféře a tím nepřímo i zdraví lidí a ekosystémů. Půda má však základní charakteristický rys, kterým je její pomalá tvorba a je proto nutno s ní nakládat jako s neobnovitelným přírodním zdrojem. Zachování tohoto zdroje pro budoucí generace by mělo být v souladu se směřováním k udržitelné společnosti. Nižší úrodnost půd je způsobena jejich degradací, takže je nutné kompenzovat úrodnost zvýšeným přísunem živin. Jednou z možností je navrácení sedimentů z vodních toků na jejich původní místo, tedy na zemědělskou půdu.

V minulosti protierozní ochrana nebyla příliš důsledně prováděna, a proto v současnosti sklízíme výsledky špatného protierozního zacházení při obdělávání polí a hospodářských pozemků. Vrchní úrodná vrstva půdy byla v důsledku toho snadno odplavována do potoků a řek a postupně se tak přemístila do jezer, rybníků a jiných vodních děl. Používání hnojiv a jiných prostředků pro zvyšování úrodnosti pak mělo za následek i zvyšování koncentrace těchto prostředků v sedimentech a voda se začala stávat příliš organicky zatíženou. Příroda již sama vodu čistit nedokáže a rybníky, které v poslední době mají význam pouze pro intenzivní chov ryb, kvalitu vody ještě zhoršují. Důsledky této intenzifikace se nyní projevují jak na kvalitě zemědělských výrobků i masa ryb, tak na jejich zdravotním stavu.

Odstranění přebytečného sedimentu ze dna vodních nádrží a koryt řek patří v současnosti k nejnaléhavějším problémům vodního hospodářství. Stav některých vodních nádrží a velikosti jejich retenčních prostorů je kritický. V nedávných letech na tento problém upozornily velké povodně a jejich následky byly hrozné. Množství a rozsah povodní však nelze přičítat pouze kapacitě retenčního prostoru. Jedná se pouze o jeden z mnoha faktorů, z nichž některé ovlivnit svojí činností můžeme a jiné ne.

Abychom se vypořádali s tímto dědictvím, musíme ozdravit prostředí, zatížené dosavadním špatným přístupem. Zlepšené podmínky ve vodním ekosystému mimo jiné mohou přinést i posílení přirozené samočisticí schopnosti vody.

Kvalita vody patří mezi nejdůležitější faktory pro život, a proto je nezbytně nutné navrátit tokům, nádržím a rybníkům možnost tuto kvalitu ovlivňovat v co nejpřirozenějším průběhu.

## 2 Problematika sedimentů ve vodních nádržích

Materiál uložený na dně hydrografické sítě je výsledkem působení erozních procesů v povodí, transportu a sedimentace půdních částic. Činnost vody a větru, jež v přirozených podmínkách probíhala zvolna, z hlediska lidské generace téměř nepozorovaně, se v intenzivně využívané krajině výrazně zrychlila. Do vodního prostředí se kromě splavované půdy dostávají nejrůznější chemické látky používané v zemědělství, lesnictví nebo vypouštěné jako odpadní vody. Tato skutečnost je důvodem zmíněné opatrnosti při využití sedimentů na zemědělských nebo lesních půdách. Využití představuje do určité míry návrat materiálu do místa jeho původu. Je žádoucí pro úpravu fyzikálních, chemických a biologických vlastností půd, zejména těch půd, které jsou dlouhodobě postiženy zrychlenou erozí. Při erozních procesech dochází ke ztrátě jemných půdních částic, mění se půdní textura i struktura a snižuje se vodní kapacita půdy. Erozní procesy vyšší intenzity smývají značnou část vrchního půdního horizontu, nižší horizont, obvykle s menším obsahem organické hmoty a s menší propustností, nepřijímá srážkovou vodu. Doplnění vyplavené půdní frakce a živin může významně přispět ke zvýšení půdní úrodnosti, ale i ke zlepšení dalších funkcí půd v životním prostředí, zejména funkce vodohospodářské. S ohledem na velké procento půd ohrožených v České republice erozí (okolo 50 % orné půdy) jde o problém významný [4].

### 2.1 Vznik a vlastnosti sedimentů

Sedimenty vznikají rozrušením starších hornin, transportem horninového materiálu a následným usazováním minerálních částic a úlomků nebo vylučováním látek z roztoků. Některé sedimenty jsou od prvopočátku pevné, jiné jsou nejprve sypké (volné) a teprve v průběhu diagenese dochází k jejich zpevnění [1].

Základní typy sedimentů:

- klastické neboli úlomkovité (detritické)
- organogenní
- chemogenní

Intenzita znečištění a chemismus vlastního sedimentu jsou značně závislé na jeho zrnitosti. Fluviální sedimenty jsou velmi různorodé podle místa a způsobu usazování. I hrubozrnné usazeniny řečišť v horní části horských toků zahrnují jemné povodňové hlíny, které jsou příznivější pro akumulaci nežádoucích prvků.

Sedimenty nádrží, jezer a rybníků jsou značně rozmanité, nejčastěji to bývají jemné písky, jíly a slíny. Mnohé nádrže a rybníky zarůstají vegetací, jejíž zbytky se ukládají do sedimentů. Usazování ve většině rybníků a nádrží probíhá klidně, kromě přívalových dešťů a jiných klimatických událostí, a proto sedimenty jsou pravidelně ukládány a jemně horizontálně zvrstvené.

Rybniční materiál je občas označován jako subhydrická půda, ve které se uplatňuje vyšší organický podíl (vyšší rostliny, plankton). Redukční podmínky v rybnících podmiňují vznik

sírníků, naopak letnění způsobuje oxidaci a vznik síranů a volné kyseliny sírové. Dochází tak k zvyšování kyselosti rybníční půdy.

Zcela zvláštní postavení mají odpady po těžbě nerostných surovin, i když se jedná často o silně toxický materiál, který je přemístěný a rozprostřený na velkém areálu. Je známo, že na hlušinách z historické těžby byly vybudovány zahrádkářské kolonie nebo dokonce obytné objekty. Toxický horninový materiál byl využíván při stavbě cest nebo tvoří haldy, které ohrožují okolí a jsou následně rozváženy na skládky. Jakmile je znečištěný a kontaminovaný materiál z hornické činnosti přemísťován z původního místa, měl by být též označen jako odpad.

Problém s kvalitou sedimentu nastává v okamžiku, kdy odbahňujeme prvky hydrografické sítě, které jsou kontaminovány komunálními odpady i jinými zdroji znečištění. Jsou to např. asimilační nádrže, dočišťovací nádrže, biologické rybníky, dešťové zdrže apod. Také usazeniny z toků protékajících sídly bez odpovídajícího stupně čištění mohou obsahovat nebezpečné minerální i organické látky.

Tlak na životní prostředí se projevuje ve zvyšujících se koncentracích nebezpečných látek ve vodách, v půdě, či v potravních řetězcích. Některé, takzvané mikropolutanty, jsou přitom toxické již při velmi nízkých koncentracích, řádově ppm. Jde především o toxické kovy (Cd, Zn, Mn, Hg, Pb atd.) a organické mikropolutanty (PCB, PAH, rezidua pesticidů a ropných látek atd.). Forma jejich výskytu přitom může být bodová: například benzinové pumpy, výpustě a skládky jedovatých odpadů, anebo plošná rozptýlená po velkých plochách v relativně nízkých, přesto však toxicky významných koncentracích [1].

Zůstávají-li sedimenty v anaerobních podmínkách, shromažďují v sobě znečištění. Důvody zachytu znečišťujících látek v sedimentech jsou především vysoký specifický povrch minerálních částic, vysoký obsah organické hmoty a specifické mikrobiální procesy, probíhající v anaerobním prostředí sedimentů.

Vysoký povrch minerálních částic je významný především pro vazbu elektricky nabitých polutantů, zejména kationtů toxických kovů, jako jsou například Cd, Cu, Hg, Pb, Zn, Mn. Je to proto, že většina jílových minerálů má na svém povrchu permanentní negativní náboj. Nejjemnější velikostní frakce minerálních částic sedimentu obsahují také díky svému vyššímu specifickému povrchu vyšší koncentrace toxických kovů než frakce hrubší.

Sledování vybraných chemických vlastností sedimentů z rybníků a drobných vodních toků ukazuje, že však okolo 90 % z nich neobsahuje zvýšené obsahy rizikových látek. Pokud mají tyto sedimenty navíc příznivou zrnitostní skladbu a obsahují organickou hmotu, jsou využitelné pro zúrodnění půdy. Kvalita sedimentu, zejména jeho fyzikální a chemické vlastnosti, je rozhodující při posuzování možnosti aplikace na půdu [1].

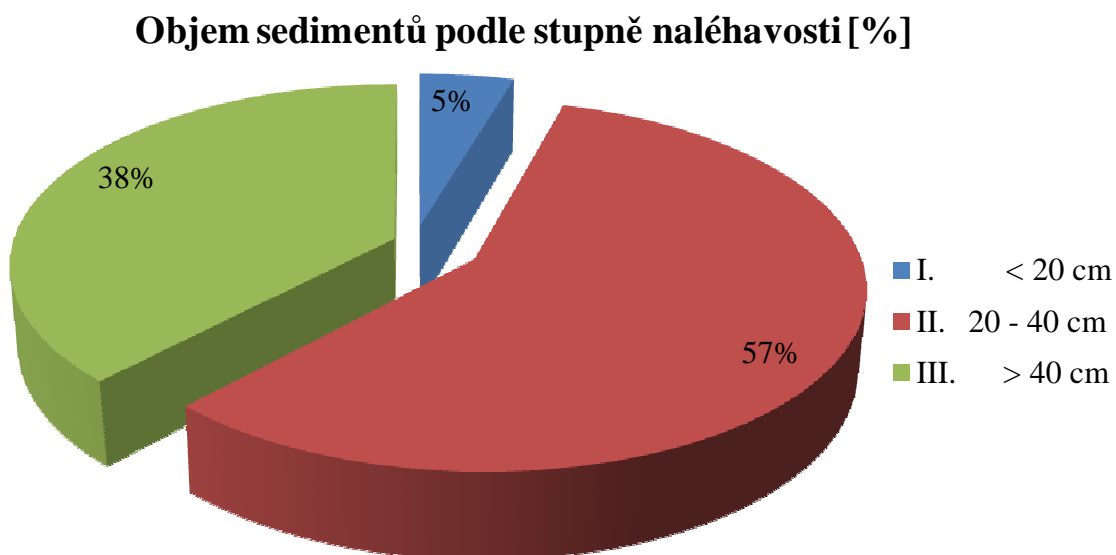
## 2.2 Stav rybničního bahna v ČR

Enormní zabahnění rybníků je zásadním problémem rybniční soustavy ČR. V současné době je počet rybníků a vodních nádrží v České republice odhadován na cca 25 000. V nich je uloženo téměř 200 mil. m<sup>3</sup> usazenin. K tomu je ještě nutno dále brát v potaz sedimenty litorálního pásu – rybničních okrajů, v úhrnné výši 46 miliónů m<sup>3</sup>. Celková zatopená plocha je okolo 52 000 ha a teoretický retenční objem těchto vodních děl je cca 625 mil m<sup>3</sup>. Z uvedených informací vyplývá, že v současné době je přibližně 1/3 tohoto objemu zanesena sedimenty. Vnos sedimentů do rybníků a malých vodních nádrží činí cca 1,0 až 2,0 mil.m<sup>3</sup>/rok. Ačkoliv proces odbahňování probíhá s rozdílnou intenzitou kontinuálně, oproti počátku 60. let minulého století došlo ke zvýšení usazenin v rybnících a malých vodních nádržích o 13-15 miliónů m<sup>3</sup> [2].

Vodní nádrže jsou rozděleny z hlediska naléhavosti odstranění sedimentu do tří tříd [3]:

- I. Nádrže zanesené zatím na přijatelné úrovni, odstranění nutné v časovém horizontu po roce 2020. Přesto je akumulací prostor nádrží snižen cca o 10 – 20 %.
- II. Nádrže s mocností usazenin 0,2 – 0,4 m, těžba nutná v příštích 7 – 15 letech.
- III. Nádrže prakticky zazemněné, průměrná mocnost usazenin větší než 0,4 m, nutný okamžitý zásah.

Pro představu o objemech sedimentů v rybnících podle stupně naléhavosti je zde uveden graf na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Odhad stavu rybničního bahna podle kategorie naléhavosti

Důsledky zanesení rybníků [3]:

- V rybnících je uloženo cca 197 mil. m<sup>3</sup> hmoty. O tento objem je snížena jejich akumulační schopnost, současně klesá i retenční účinnost v protipovodňové ochraně; hmota sedimentů představuje trvalou zátěž pro rybníční ekosystém a vodohospodářskou soustavu jako celek.
- Dochází k významnému nepoměru mezi katastrální a skutečnou plochou rybníků. Jestliže se odhaduje současná výměra rybníčních ploch v České republice hodnotou přes 50 tis. ha, je třeba si uvědomit, že skutečná výměra vodních ploch je v důsledku zrychleného zazemňování v rybníčních okrajích snížena na zhruba 35 tis. ha.
- Snižuje se biologická hodnota rybníků; nárůst organické hmoty vede k rychlému vymělčování litorálního pásu, nastává dynamický rozvoj „tvrdé“ vodní vegetace, z pobřežního pásu se stává unifikovaný biotop s porosty zblochanu, skřípiny a chrastice, s omezenými stanovištními podmínkami pro řadu živočišných druhů.

Rizika spojená s nadměrným zatížením vodních nádrží [3]:

- Zanášení prostoru nádrží usazeninami primárně omezuje jejich aktivní prostor, což vede ke snížení akumulace v nádržích a tedy ke zhoršení bilance vody v krajině, snížení míry ochrany proti povodním, snížení zabezpečení odběrů vody z nich a samozřejmě k omezení jejich hospodářské využitelnosti.
- Z hlediska kvalitativního představují usazeniny obrovskou zásobu živin, které se mohou kdykoliv nekontrolovaně vrátit do vodního prostředí. Vnitřní zásoba živin v usazeninách permanentně udržuje stav vysoké trofie rybníční vody vyjádřený dynamickým rozvojem organické hmoty. Zejména pokud není tento stav udržován v přijatelných mezích výkonnou rybí obsádkou, může dojít k nebezpečným zpětným dopadům na jakost vody.
- Především v mělčích rybníčních okrajích – litorálním pásu – dochází velmi rychle ke snížení hloubky vody pod 40 cm, což je hranice, při které je rychlost nárůstu tvrdé vodní vegetace větší než doba rozkladu takto vytvořené biomasy a rybník se zazemňuje – tzv. „vyrůstá z vody“. Tím je dáno, že přírůstek množství sedimentu v rybníčních okrajích je výrazně rychlejší než přírůstek množství rybníčního bahna v centrální části rybníka.

## 2.3 Metody odstraňování sedimentů

Těžbu sedimentů ze dna vodních toků a nádrží lze provádět několika způsoby:

1. Suchou cestou - pomocí buldozerů a bagrů, kdy rybník je vypuštěn a vysušen.
2. Mokrou cestou - pomocí sacího bagru, těžba je prováděna bez vypuštění nádrže.
3. Korečkovým bagrem - metoda se používá pro těžbu hrubších frakcí (písek, štěrk).
4. Pomocí výbušnin - metoda byla užívána ve vypuštěných rybnících, většinou pro čištění a odbahnění stok. Příliš se neujala.

V praxi nejčastěji využívané metody jsou podrobněji rozepsány v následujících kapitolách.

### 2.3.1 Suchá metoda

Odbahňování probíhá po úplném vypuštění vodní nádrže. Po dostatečně dlouhém časovém období, které je nutné pro vysušení bahna, se pomocí těžké techniky (bagry, buldozery, nákladní automobily) těží dnové sedimenty a následně odvázejí na místo určení. V minulosti však bylo skutečností, že docházelo pouze k vyhrnování sedimentu na okraje vodního díla a dál se již materiál nevyužíval [4].

Výhodou je, že se při vypuštění nádrže mohou provádět potřebné údržbové a rekonstrukční práce na vodním díle. Použití těžké techniky má ale velmi negativní dopad na životní prostředí v okolí těžby a na samotném dně nádrže. Často dochází k úniku provozních kapalin ze strojů a jejich pohyb devastuje přístupové cesty, břehy a rostlinstvo. Před vypuštěním nádrže je také nutné vylovit veškeré vodní živočichy. Způsob takovéto těžby je zobrazen na obr. 2.2 [4].



*Obr. 2.2 Těžba sedimentů ze dna vypuštěného rybníka*

Zásah do vodního díla je charakteru spíše stavebního než biotechnologického. To znamená, že je zpravidla odstraněno veškeré bahno, včetně malé vrstvy aktivního bahna, nutného pro vyváženost rybníčního ekosystému a podstatně ovlivňujícího primární produkci rybníka. Po opětovném napuštění trvá několik let, než se ekosystém vodní nádrže vrátí do stavu před vypuštěním. Nezanedbatelné je také zatížení okolí značnými hlukovými emisemi. Trpí jimi nejenom lidé, ale i ptactvo a jiní živočichové, pro které je vodní nádrž a její okolí přirozeným teritoriem.

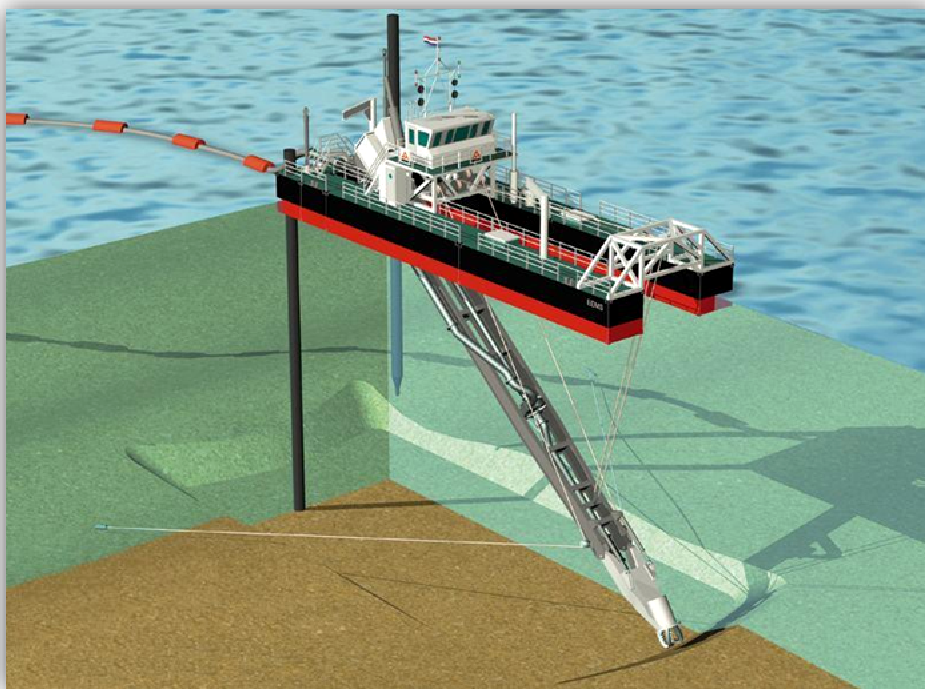


Kvalita vytěženého bahna je znehodnocena promícháváním vrstev a druhů bahna, a tím je ztížena jeho další použitelnost v zemědělství. Vypuštěný rybník je po dobu těžby vyřazen z funkce, což má pro vlastníka negativní ekonomický efekt a zvláště u průtočných rybníků v kaskádě s jinými to ovlivňuje celé povodí. Voda vytékající z vytěžovaného průtočného rybníka obsahuje velké množství nerozpuštěných látek, kterými zatěžuje tok pod rybníkem, popř. Zanáší rybníky ležící pod vytěžovaným objektem. Úspěch odbahnění je závislý na počasí, zejména na průběhu srážek.

### 2.3.2 Mokrá metoda

Jedná se o metodu relativně novou a u nás zatím ne příliš používanou. Jelikož není příliš známá, naráží na předsudky spojené s neznalostí. V zahraničí (především v USA) je však hojně využívána a to i například na obrovských vodních plochách severoamerických jezer. Technologie odbahnování spočívá na využití sacího bagru, které se pohybuje na vodní hladině (viz obr. 2.3) [4].

Sací bagr pracuje jako kalové čerpadlo, které pomocí rozdrůžovacích nástrojů těží sedimenty ze dna nádrže. Vytěžený sediment je nutno naředit (obvykle na 5 - 10 % sušiny), aby byl snadno dopravitelný potrubím do potřebné vzdálenosti (až několik km). Pokud je to možné, je suspenze přímo rozstříkována na okolní pozemky. V případě, že sedimenty nelze využít na zemědělskou půdu (viz kapitola 3) je nutné vytěženou suspenzi odvodnit. K tomu je nutné vybudovat buď sedimentační laguny, nebo suspenzi odvodnit strojně.



*Obr. 2.3 Model technologie těžby sedimentů pomocí sacího bagru*

Hlavní devizou této technologie je především to, že vodní dílo nemusí být vypuštěno. Není proto nutné vylovit případnou rybí obsádku a nádrž může být i nadále pro hospodářské i rekreační aktivity. Zůstanou uchráněny i litorály a okolí vodní nádrže. Těžba může probíhat za jakýkoliv klimatických podmínek vyjma silných mrazů. Sací bagr může na základě solidně provedeného průzkumu těžit bahno podle frakcí, čímž se jeho hodnota z hlediska další použitelnosti zvyšuje. Z rybníka je nutno odtěžit zejména vrstvu černého, organickými látkami bohatého bahna, tvořenou převážně sapropelem a detritem. Avšak pro další funkci rybníka je důležité určitou tenkou vrstvu tohoto aktivního bahna zanechat, což právě mokrá metoda umožňuje. Je možné také odbahňovat na pokračování podle momentálních nároků z hlediska upotřebitelnosti bahna (agrotechnické lůžky). Pokud je plocha nádrže větší než několik ha a objem sedimentu větší než 10 000 m<sup>3</sup> je mokrá metoda levnější než metoda suchá.

Pro rekultivaci litorálních pásem je nutno využít kombinace suché a mokré metody, nebo použít k tomuto účelu uzpůsobené mechanismy, jejichž provoz je však nákladný.

### **Popis funkce sacího bagru**

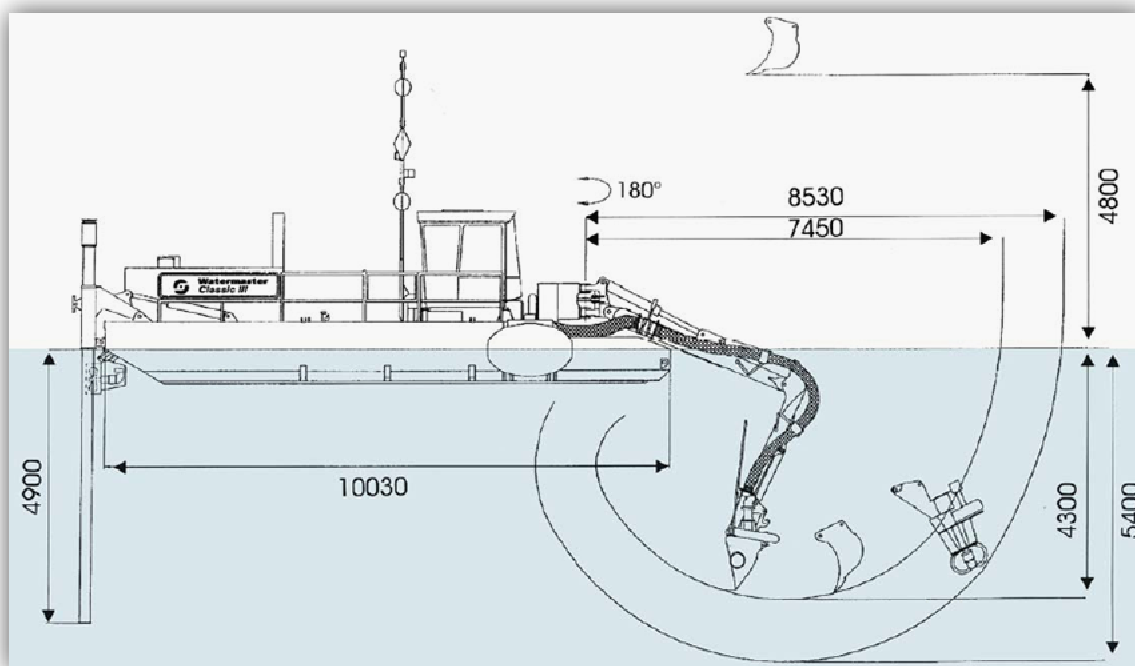
Plovoucí sací bagr je zařízení, které naruší a "vysaje" těžený materiál ze dna vodní plochy. Bagrovací čerpadlo zároveň těžený materiál dopravuje do místa uložení nebo dalšího zpracování. V případě delší dopravní trasy nebo většího převýšení je výkon čerpadla podpořen přečerpávacími stanicemi. Bagr se dle své konstrukce pohybuje po vodní hladině buď pomocí kotevních lan, nebo pomocí vlastního pohonu. Bagr je poháněn dieslovým motorem s hydraulickým rozvodem k jednotlivým agregátům. Skutečná podoba sacího bagru je představena obr. 2.4 [4].



*Obr. 2.4 Sací bagr Watermaster*

Plovoucí sací bagr k těžbě využívá ponorné kalové čerpadlo, které je umístěno na bagrovací lopatě. Lopata umožňuje výškově selektivní odběr sedimentu ve vrstvách a zabraňuje vytváření prohlubní při těžbě. Pro těžbu hutněji uložených sedimentů je lopata opatřena rozrývákem, který rozruší sediment na hloubku cca 15 - 20 cm. Sací kalové čerpadlo je na ramenu umístěno horizontálně. Sací síla čerpadla je směřována horizontálně a lopata svou přední částí vyděluje vrstvu sedimentů o určité tloušťce k čerpadlu.

Prostorovou navigaci sacího bagru zajišťuje automatika stroje, která umožňuje sledování určené brázdy či výseč, nebo je zajištěna (kontrolována) teodolitem s dálkoměrem či jiným vhodným způsobem ze břehu nádrže. Výškovou polohu lopaty (hloubku pod vodní hladinou) lze nastavit automaticky a sledovat na palubních přístrojích. Provozní hlučnost stroje je na velmi nízké úrovni. Sací ústí čerpadla bagru je opatřeno česly, což zabraňuje nasátí ryb i různých předmětů. Konstrukční uspořádání a pracovní rozsah sacího bagru je znázorněn na následujícím schématu (viz obr. 2.5) [4].



Obr. 2.5 Schéma pracovního rozsahu sacího bagru Watermaster

Přeprava těžené směsi se uskutečňuje výhradně výtlakem ve svařovaném PE potrubí bez jakékoli hlukové zátěže, úkapů, prašnosti, zvýšených nároků na zábor pozemků apod.

Existuje mnoho různých typů sacích bagrů. Na velké vodní plochy se používají stroje, které dosahují rozměrů až v řádech desítek metrů. Pro menší vodní nádrže nebo koryta řek, je vhodné použít malé sací bagry, které se dovedou pohybovat pomocí vlastního pohonu, jsou snadno ovladatelné a obratné.

## 2.4 Způsoby využití těženého sedimentu

Využití získaného sedimentu je závislé na výsledcích provedeného průzkumu dna a analýz vzorků. V případě, že výsledky jsou v souladu s platnou legislativou, jejíž znění se neustále mění, lze bahno využít následujícím způsobem. Uvedeny proto budou i možnosti, které by pravděpodobně v budoucnu odpovídaly schválené legislativě [4]:

- zúrodňující nebo rekultivační prvek v zemědělství
- přírodní ekologické hnojivo
- kompost nebo jeho součást
- zúrodňující prvek pro těžený rybník nebo jiné rybníky
- rekultivační prvek pro výsypky nebo lesy, lesní školky
- materiál na výrobu travních a střešních biokoberců
- hrubší frakce ve stavebnictví

### **Zúrodňovací a rekultivační prvek**

Písčité zrnitější frakce lze využít pro vylehčení těžkých půd, nadbytečné množství bahna jako celku pro zúrodnění písčitých neúrodných půd s malým obsahem organických látek. Pro tyto účely je vhodnější použít vytěžené bahno z litorálních pásem se zbytky litorálních a sublitorálních rostlin.

### **Přírodní ekologické hnojivo**

Jako přírodní hnojivo lze použít sediment pro přímý rozstřík, a to po doplnění chybějících nutrientů do optimální hodnoty požadované pro danou kulturu podle osevního postupu koncového uživatele. K tomu je samozřejmě vhodná mokrá metoda těžby. Rozstřík je možno provádět hydrocestou přímo, nebo na větší vzdálenosti fekálním vozidlem.

Hnojivo je také možné vyrobit pomocí fermentorů. Proces probíhá ve fermentačních boxech, kde se fermentovaná hmota zahřeje pomocí termofilních bakterií na teplotu 60 – 70 °C. Tím se urychlují mineralizační a kompostovací procesy (4 - 9 dní), navíc jsou splněny požadavky hygieniků pro ničení případných choroboplodných zárodků a z hlediska agrotechnického dojde ke zničení případných plevelů. Metodu je vhodné začlenit do komplexního ekoprogramu, který řeší otázku komunálních odpadů, tedy vhodné využití bioodpadu a přebytečných zemědělských exkrementů. Výrobek je důležitý pro organizaci alternativního zemědělství.

### **Kompost nebo jeho součást**

Rybniční bahno buď samotné, nebo jako komponent (podle výsledků analýz) lze kompostovat. Má to však určité nevýhody [4]:

- Proces zrání trvá až dva roky a je nutno zajistit prostory pro zrání.
- Zemědělci mají z agrotechnického hlediska oprávněné námitky proti výskytu semen různých plevelů.
- Kompostování je však levnější než fermentování
- Kompostovat je vhodnější bahno vytěžené suchou metodou.

### **Využití v rybníkářství**

Jak ukázal průzkum mnoha rybníků, rybníční bahno nesedimentuje rovnoměrně. Často lze zjistit, že kolem hlavní stoky, loviště a přítoku je bahna až škodlivé množství, kolem některých oblastí břehu i dále je tvrdé dno nebo písek. Pomocí nízkých ponořených hrázek (připravených z dřeva nebo jiného materiálu), zabudovaných do dna, lze připravit složiště pro vrstvu sedimentu, která zvětší dnovou produkční plochu. Lze tak část těženého bahna v rybníku pouze přemístit a produkce rybníka se zvýší. Totéž lze aplikovat i v jiných okolních rybnících.

### **Rekultivace lesa a výsypek**

Pokud některý z parametrů překročí koncentraci požadovanou normou pro kompost I. jakosti, lze uplatnit bahno buď při pěstování technických plodin, nebo použít pro rekultivaci lesa nebo výsypek. Rekultivace je vhodná zvláště v lesních školkách a nově zalesněných pasekách.

### **Výroba travních a střešních koberců**

Část vytěženého rybníčního bahna lze využít při výrobě substrátu pro vegetační travní koberce, které se používají jednak v zahradní architektuře, parcích, při zakládání protierozních pásů.

## **2.5 Legislativní požadavky pro nakládání s rybníčními sedimenty**

Od 23. ledna 2009 nabyl na účinnosti zákon č. 9/2009 Sb., který mění dosud platný zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech a pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd, ve změně pozdějších předpisů, a další související zákony. Dále je nutno uvést, že zákonem č. 9/2009 Sb. byl také změněn zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů [5].

### 2.5.1 Příčiny schválení zákona č. 9/2009

Hlavními důvody změn bylo velmi komplikované využití sedimentů na zemědělské půdě. Neexistence obecného předpisu vedla k tomu, že nakládání se sedimenty se posuzovalo individuálně, bez předem daných pravidel. To byla velmi nevýhodná situace jak pro orgány státní správy, tak pro subjekty, které se sedimenty potřebují nakládat. Podstatnějším problémem bylo to, že nevhodným nakládáním se sedimenty, bez možnosti kontroly a regulace této oblasti, by mohlo dojít k negativním zásahům do celého potravního řetězce. Dalším negativním důsledkem by bylo zakonzervování současného nevyhovujícího stavu s velmi omezenými možnostmi využití sedimentů a tím komplikované odbahňování rybníků, dalších vodních nádrží a vodních toků.

Tento stav tedy významným způsobem komplikoval nakládání se sedimenty, což značně znesnadňovalo provádění důležitých projektů odbahňování rybníků, dalších vodních nádrží a toků. Vzhledem k tomu, že se jedná o vstupy do půdy, tedy jedné ze základních složek životního prostředí, je nutné určitým způsobem regulovat a kontrolovat způsob nakládání. Novela zákona počítá s tím, že sedimenty používané na zemědělské půdě mají být, jakožto zdroj živin, evidovány obdobně jako hnojiva, pomocné látky a upravené kaly [6].

### 2.5.2 Schválené změny a povinnosti z nich vyplývající

Několik posledních let se čekalo na ten to prováděcí právní předpis, kterým by MŽP ČR a MZe ČR stanovilo podrobnosti týkající se nakládání s vytěženými sedimenty z vodních toků a jejich limitními hodnotami, na který by se nevztahoval zákon o odpadech. Tento právní předpis nebyl nikdy publikován (zrušen § 2 odstavec 3 zákona o odpadech). Zásadní změnu způsobila uvedená novela o odpadech, která stanovila zcela jednoznačně, na co se zákon o odpadech nevztahuje, a to v oblasti vytěžených zemin a hlušin, včetně sedimentů z vodních nádrží a koryt vodních toků, které však musí vyhovovat limitům znečištění pro jejich využívání k zavážení podzemních prostor a k úpravám povrchu terénu, stanoveným v příloze č. 9 zákona o odpadech, a sedimentů z rybníku, vodních nádrží a vodních toků používaných na zemědělském půdním fondu podle zvláštních předpisů. Terénní úpravou se podle zákona stavebního rozumí zemní práce a změny terénu, jimiž se podstatně mění vzhled prostředí nebo odtokové poměry, těžební a jim podobné a s nimi související práce, nejedná-li se o hornickou činnost nebo činnost prováděnou hornickým způsobem, například skladovací a odstavné plochy, násypy, zavážky, úpravy pozemků pro zřízení hřišť a sportovišť, těžební práce na povrchu. V každém případě by takové využití sedimentů mělo probíhat v souladu nebo v rámci nějakého stavebního projektu, přičemž je nutné předem ještě počítat s nutností zpracování posouzení EIA pro typy záměrů spadající do přílohy č. 1 k zákonu č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí (i podlimitní záměry) [5].

Dále je nutné při využívání sedimentů dodržovat další požadavky zvláštních právních předpisů (zákon č. 334/1992 Sb. o ochraně zemědělského půdního fondu v platném znění, zákon č. 114/1992 Sb. o ochraně přírody a krajiny v platném znění, zákon č. 254/2001 Sb. vodní v platném znění, zákon č. 289/1992 Sb. o lesích v platném znění, Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví v platném znění, ad.). Např. nesmí dojít k narušení či ohrožení

zájmů chráněných v ochraně přírody a krajiny (významné krajinné prvky, dřeviny rostoucí mimo les, památné stromy, chráněné rostliny či živočichové, ale i obecná ochrany rostlin a živočichů, územní systém ekologické stability krajiny, zvláště chráněná území, území Natura 2000, atd.), ochraně lesa, ochraně podzemních a povrchových vod, ochraně zemědělské půdy atd., tj. především je nutné zabránit riziku výluhu rizikových prvků (těžké kovy, BTEX, PCB, PAU atd.) do vody, horninového prostředí, půdy k bodu [6].

Uvedená příloha č. 9 stanovuje limitní hodnoty koncentrací ve výše uvedených materiálech, které tímto nejsou definovány odpadem. Z toho plyne, že zákon o odpadech se na nakládání s nimi nevztahuje. Jedná se pouze o aplikaci na povrchu terénu nikoliv pro použití na zemědělské půdě. V případech výskytu vyšších hodnot koncentrací určitých škodlivin ve vytěžených materiálech, způsobených výskytem těchto látek v dané oblasti v přirozeném pozadí, se limitní hodnoty pro využití takových materiálů v dané oblasti zvyšují na prokázané hodnoty výskytu těchto látek v přirozeném pozadí [5].

Dále byl změněn § 76 odst. 1 písm. g) zákona o odpadech – výkon veřejné správy v oblasti odpadového hospodářství provádí Česká inspekce životního prostředí. Ta kontroluje, zda osoby využívající vytěžené sedimenty jako materiál k zavážení podzemních prostor a úpravám povrchu terénu, mají doklady, které osvědčují, že materiály vyhovují limitním znečištěním pro jejich využití k zavážení podzemních prostor a k úpravám povrchu terénu, a smí odebírat jejich vzorky a kontrolovat skutečné koncentrace škodlivin, jejichž limity jsou přílohou tohoto zákona stanoveny.

Změna zákona o ochraně zemědělské půdy v § 3 zákona o zemědělském půdním fondu se doplňuje o odstavce 6 a 7, které včetně poznámky pod čarou znějí [6]:

#### **Odst. (6)**

Použití sedimentů z rybníků, vodních nádrží a vodních toků je možné na pozemcích náležejících do zemědělského půdního fondu, a to pouze na druhu pozemku orná půda a trvalý travní porost při jeho obnově, se souhlasem orgánu ochrany zemědělského půdního fondu a při dodržení podmínek a postupů stanovených zákonem o hnojivech (zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, ve znění pozdějších předpisů). Souhlas se udělí, jestliže sedimenty splňují požadavky na jejich kvalitativní vlastnosti stanovené zvláštním právním předpisem a nebudou-li použitím sedimenty na pozemky poškozeny příznivé fyzikální, biologické a chemické vlastnosti půdy. Hodlá-li se použít sedimenty a pozemky osoba odlišná od vlastníka nebo nájemce pozemku, musí mít písemný souhlas vlastníka nebo nájemce pozemku.

#### **Odst. (7)**

Žádost o souhlas s použitím sedimentů z rybníků, vodních nádrží a vodních toků, která se předkládá obecnímu úřadu obce s rozšířenou působností, musí obsahovat kromě náležitostí podle správního řádu níže uvedené:

- a) identifikační údaje pozemků, na kterých mají být sedimenty použity, podle katastru nemovitostí, a uvedení celkového množství sedimentů, které má na nich být použito,
- b) souhlas vlastníka nebo nájemce pozemků, na kterých mají být sedimenty použity,
- c) údaje o kvalitě sedimentů v rozsahu stanoveném zvláštním právním předpisem,



- d) údaj o původu sedimentů,
- e) informace o způsobu vzorkování půd a sedimentů a o technologickém zpracování
- f) sedimentů před použitím,
- g) údaje o kvalitě půdy, na kterou mají být sedimenty použity, v rozsahu stanoveném zvláštním právním předpisem,
- h) potvrzení laboratoře o odběru a hodnocení vzorků sedimentu a půdy, na kterou mají být sedimenty použity, s uvedením akreditace pro dané hodnocení. Kompetence obecnímu úřadu obce s rozšířenou působností je dána § 15 písm. j) zákona o zemědělském půdním fondu. Tyto orgány „udělují souhlas podle § 3 odst. 6 k použití sedimentů z rybníků, vodních nádrží a vodních toků a vedou evidenci jejich použití na pozemcích ve svém správním obvodu.

Sedimenty nesmějí být používány, pokud obsah rizikových prvků a rizikových látek v sedimentu a v půdě, na kterou mají být použity, a další vlastnosti sedimentu překročí limity stanovené zvláštním právním předpisem. Limitní hodnoty koncentrací škodlivin ve vytěžených zeminách a vytěžených hlušinách, včetně sedimentů z vodních nádrží a koryt vodních toků jsou uvedeny v následující tabulce (viz tab. 2.1).

Ukazatel	Jednotka	Limit	Ukazatel	Jednotka	Limit
ZN	mg/kg sušiny	600	Ba	mg/kg sušiny	600
Ni	mg/kg sušiny	80	Be	mg/kg sušiny	5
Pb	mg/kg sušiny	100	AOX <sup>1)</sup>	mg/kg sušiny	30
As	mg/kg sušiny	30	Uhlovodíky C10-C40	mg/kg sušiny	300
Cu	mg/kg sušiny	100	Trichlorethylen	µg/kg sušiny	50
Hg	mg/kg sušiny	0,8	Tetrachlorethylen	µg/kg sušiny	50
Cd	mg/kg sušiny	2,5	BTEX <sup>2)</sup>	µg/kg sušiny	400
V	mg/kg sušiny	180	PAU <sup>3)</sup>	µg/kg sušiny	6 000
Co	mg/kg sušiny	30	PCB <sup>4)</sup>	µg/kg sušiny	200

<sup>1)</sup> AOX - absorbovatelné organické halogeny

<sup>2)</sup> BTEX - monocyklické aromatické uhlovodíky nehalogenové (suma benzenu, toluenu, etylbenzenu a xylenu)

<sup>3)</sup> PAU - polycyklické aromatické uhlovodíky (suma anthracenu, benzo(a)anthracenu, benzo(b)fluoranthenu, benzo(k))

<sup>4)</sup> PCB - ostatní aromatické uhlovodíky halogenové (suma kogenerů č. 28,52 101, 118, 138, 153 a 180)

*Tab. 2.1 Limitní hodnoty koncentrací škodlivin ve vytěžených zeminách a hlušinách, včetně sedimentů z vodních nádrží a koryt vodních toků*

Sedimenty na zemědělské půdě nesmějí být používány na zemědělské půdě a lesních pozemcích, pokud [5]:

- a) jejich vlastnosti neumožňují rovnoměrné pokrytí pozemku,
- b) způsob jejich použití nevede k rovnoměrnému pokrytí pozemku;



- c) jejich použití může vést k poškození fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností zemědělské půdy, lesního pozemku nebo pozemků sousedících s tímto pozemkem, popřípadě i jeho širšího okolí,
- d) půda, na kterou mají být použity, je 1. zaplavená, 2. přesycená vodou, 3. pokrytá vrstvou sněhu vyšší než 5 cm, nebo 4. promrzlá tak, že povrch půdy do hloubky 5 cm přes den nerozmrzá.

Zemědělství podnikatelé jsou povinni řádně vést evidenci o sedimentech použitých na zemědělské půdě. Evidence se vede o množství, druhu a době použití sedimentů podle jednotlivých pozemků, plodin a let a uchovává se nejméně 7 let. Na požádání ústavu jsou zemědělství podnikatelé povinni evidenci předložit a umožnit ověření v ní uvedených údajů.

Záznam o použití sedimentu musí být v evidenci proveden do 1 měsíce od ukončení jeho použití. Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí stanoví vyhláškou podmínky a způsob používání sedimentů na zemědělské půdě, způsob vedení evidence o použití sedimentů, limitní hodnoty rizikových prvků a rizikových látek v sedimentu a v půdě, na kterou má být použit, požadavky na další fyzikálně-chemické a biologické vlastnosti sedimentu a postupy rozboru sedimentů a půdy, včetně metod odběru vzorků.

Novela zákona o hnojivech, která současně změnila zákon o odpadech a ochraně zemědělského půdního fondu, má tedy pro všechny správce toku, vlastníky rybníků a vodních nádrží nemalý význam. Jsou jednoznačně určena pravidla včetně limitních hodnot koncentrací škodlivin mj. i ve vytěžených sedimentech z vodních nádrží a koryt vodních toků a jejich možné další využití. Vytěžené sedimenty je možné využít na zemědělské půdě za stanovených podmínek zvláštních právních předpisů na ochranu zdraví lidí a životního prostředí. Využitím sedimentů vracíme do půdy částice, o které byla ochuzena erozí a dalšími degradačními vlivy. Avšak při sedimentaci těchto částic ve vodním prostředí dochází k interakcím s dalšími látkami přítomnými ve vodě a může docházet k obohacování sedimentů rizikovými prvky. Je proto nutné předem zmiňované posouzení obsahu těchto rizikových prvků a stanovení limitů před aplikací do půdy (zvláště těžké kovy, BTEX, PCB, PAU atd.), viz příloha č. 9 odpadového zákona. Podle § 3 zákona č. 334/1992 Sb.: Použití sedimentů z rybníků, vodních nádrží a vodních toků je možné na pozemcích náležejících do zemědělského půdního fondu, a to pouze na druhu pozemku orná půda a trvalý travní porost při jeho obnově, se souhlasem orgánu ochrany zemědělského půdního fondu a při dodržení podmínek a postupů stanovených zákonem o hnojivech. Souhlas se udělí, jestliže sedimenty splňují požadavky na jejich kvalitativní vlastnosti stanovené zvláštním právním předpisem a nebudou-li použitím sedimentů na pozemky poškozeny příznivé fyzikální, biologické a chemické vlastnosti půdy. S vytěženými a dostatečně odvodněnými sedimenty je nutné nakládat tak, aby nebyly tekuté či následnou sedimentací nedocházelo ke vzniku kapalné fáze [2].

Dotčené subjekty:

- a) Zemědělství podnikatelé
- b) Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský
- c) Ministerstvo zemědělství

- d) Ministerstvo životního prostředí
- e) Obecní úřady obcí s rozšířenou působností
- f) Podnikatelské subjekty, které provádí odbahnění rybníků, vodních nádrží, vodního toku
- g) Vlastníci a uživatelé rybníků a vodních nádrží, správci vodních toků
- h) Akreditované laboratoře, pověřené osoby

#### **Posouzení nákladů a přínosů**

Zavedení vyhlášky přinese zvýšené nároky na státní rozpočet (cca 10,5 mil. Kč/rok) a dále si vyhláška vyžádá, v návaznosti na novelu zákona o hnojivech vzniklou kompetenci obcí s rozšířenou působností udělovat souhlas k použití sedimentů z rybníků, vodních nádrží a vodních toků a vést evidenci použití sedimentů na pozemcích v jejich správním obvodu a tím navýšení výdajů z rozpočtů těchto obcí. Vyhláška nebude mít negativní vliv na podnikatelské prostředí, protože pouze stanoví podmínky a způsob nakládání se sedimenty a neukládá soukromým subjektům povinnosti. Tyto ukládá pouze novela zákona o hnojivech. Dále se změna zákona zabývá pouze technickými podrobnostmi již existující povinnosti, bude mít pozitivní vliv na životní prostředí a nebude mít žádné negativní sociální dopady [2].

#### **Implementace a vynucování**

Vzhledem k tomu, že návrh vyhlášky pouze provádí příslušná ustanovení zákona o hnojivech, jsou příslušné požadavky týkající se implementace a vynucování upraveny již na úrovni tohoto zákona. Sankce za porušení požadavků stanovených návrhem vyhlášky jsou stanoveny rovněž zákonem o hnojivech. Pokud se týká prostředků nutných k zajištění kontrol, je možno předpokládat, že personální zdroje kontrolního orgánu (ÚKZÚZ) jsou v současné době schopny pokrýt nárůst počtu kontrol, který se uvažuje v řádu desítek ročně.

#### **Přezkum účinnosti**

Regulace oblasti používání sedimentů na zemědělské půdě je řešena legislativní formou a ta ze své podstaty má svá specifika při hodnocení efektivity. Zda je příslušná právní úprava účinná, se neukáže zpravidla dříve než za tři až pět let. S přihlédnutím k obecnému požadavku na stabilitu práva a k celkové situaci v regulované oblasti, je nutno posuzovat ve výše uvedeném časovém horizontu všechny relevantní právní předpisy komplexně a z toho důvodu není na místě omezovat účinnost vyhlášky na konkrétní období [2].

### 3 Měření odvoditelnosti vybraných sedimentů

Před návrhem jakékoli technologie je nejprve nutné provést důkladnou analýzu fyzikálních a chemických vlastností upravovaného materiálu.

Cílem měření je zjistit zda je vhodné použít strojního zařízení pro odvodnění sedimentů vyskytujících se například ve vodních nádržích. Zkoušky byly provedeny v laboratořích ÚPEI v Brně. Samotné měření odvoditelnosti sedimentů pak bylo provedeno v laboratoři společnosti Humeco a.s. v Komořanech.

Měření probíhala podle následujícího schématu (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Schéma postupu měření odvoditelnosti sedimentů

### 3.1 Měření fyzikálních vlastností sedimentů

Odběr vzorků byl proveden na Brněnské přehradě. Sediment byl odebírán pod vodní hladinou na více místech nádrže během jednoho dne a poté spojen do jednoho vzorku. Přesto je nutné zdůraznit, že složení sedimentů na dně jakékoliv vodní nádrže je velmi různorodé a k dokonalému zmapování by bylo potřeba speciálních měřicích přístrojů. Následující měření proto nelze považovat za naprosto směrodatné pro Brněnskou přehradu.

Po úplném usazení a odstranění přebytečné vody slitím ze vzorku byla část vzorku umístěna na váhy pro zjištění obsahu sušiny. Bylo naměřeno, že vzorek obsahuje přibližně 52 % sušiny. Předpokládaný obsah sušiny v suspenzi přicházející do technologie je 5-9 %, proto byla část vzorku naředěna vodou na hodnotu na požadovanou hodnotu 7 % suspenze.

S připraveným vzorkem byla provedena měření pro zjištění základních fyzikálních vlastností zkoumané suspenze:

1. Měření hustoty
2. Měření viskozity
3. Stanovení času kapilárního sání (CST)
4. Určení vhodného poměru přidávaných fukulantů pomocí CTS

Zbytek původního vzorku sedimentů, který byl odebrán z Brněnské přehrady, byl vložen do sušárny a po úplném vysušení byl určen pro měření granulometrického složení sedimentů.



*Obr. 3.2 Vzorek usazenin ze dna vodní nádrže*

#### 3.1.1 Měření hustoty

Hustota patří mezi nejdůležitější vlastnosti zkoumané suspenze. Měří se nepřímou pomocí piktometrů. Pro stanovení hustoty suspenze  $\rho_s$  bylo nutné změřit nejprve hmotnost prázdného piktometru  $m_p$ , zjistit jeho přesný objem  $V$  a následně hmotnost soustavy piktometr-suspenze  $m_{ps}$ . Pomocí známých fyzikálních vztahů se následně přepočítaly známé veličiny na hledanou hodnotu suspenze.

$$\varrho_s = \frac{m_s}{V_p} \quad (3.1)$$

Parametr	Piktometr 18	Piktometr 4	Piktometr 33
Hmotnost piktometru $m_p$ [g]	24,630	23,168	24,64
Hmotnost piktometru a suspenze $m_{ps}$ [g]	78,16	74,492	79,286
Hmotnost suspenze $m_s$ [g]	53,53	51,324	54,646
Objem piktometru $V_p$ [ml]	50,399	50,0	50,220
Hustota suspenze $\rho_s$ [g/l]	1062,12	1022,45	1088,13

Tab. 3.1 Výsledné hodnoty měření hustoty

Měření bylo provedeno třikrát, abychom získali co nejpřesnější hodnotu hustoty. Hmotnost suspenze je u jednotlivých měření různá, protože odebrané vzorky suspenze nemají vždy stejné granulometrické složení. Výsledná odhadovaná hustota je tedy:

$$\varrho_s \cong 1050 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

### 3.1.2 Měření viskozity

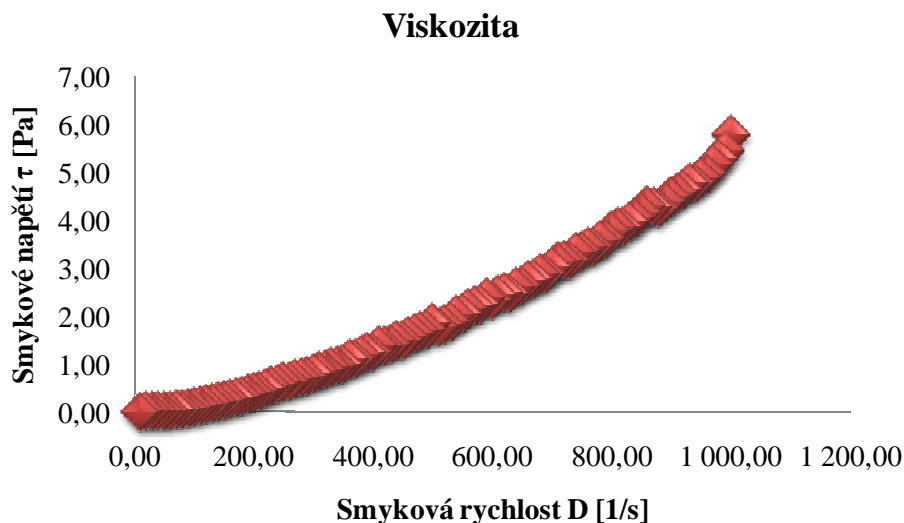
Viskozita suspenze  $\eta_s$  závisí na vlastnostech dispergovaných částic (rozměr, tvar, struktura, stlačitelnost, vzájemné působení částic), které jsou vyjádřeny pomocí empirických koeficientů  $\alpha_i$ , dále na objemové koncentraci  $x_v$  a na viskozitě kapalně fáze  $\eta_k$ .

$$\eta_s = \eta_k(1 + \alpha_0 x_v + \alpha_1 x_v^2 + \alpha_2 x_v^3) \quad (3.2)$$

Rozsah $x_v$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\eta_s \cdot 10^{-3}$ [Pa.s]
< 0,20	2,5	-	-	-
< 0,40	4,5	-	-	-
< 0,35	2,5	7,17	16,2	3,4479
< 0,30	2,5	7,35	-	-
< 0,30	2,5	10,5	-	-
< 0,30	2,5	6,25	15,7	2,7364

Tab. 3.2 Výsledné hodnoty viskozity

Pro usnadnění výpočtu viskozity byl použit rotační viskozimetr RhelolabQC. V následujícím grafu (viz obr. 3.3) je znázorněna závislost viskozity na smykové rychlosti a smykovém napětí. Kompletní soubor naměřených hodnot je pak uveden v příloze.



Obr. 3.3 Graf závislosti smykové rychlosti na smykovém napětí

Z uvedené závislosti je patrné, že se jedná o dilatantní (houstnoucí) kapalinu. Houstnutí je možno u dilatantních suspenzí vysvětlit tím, že za klidového stavu je objem mezer mezi částicemi minimální. Při vysokých hodnotách smykové rychlosti se poměrně těsné uspořádání částic změní ve vrstevnaté, kdy jednotlivé částice se pohybují jedna po druhé. Suspenze dilatuje, mezerovitost značně vzroste a nedostatek spojitě fáze kapaliny způsobí, že původně kapalinné tření se změní ve tření suché a tím se zdánlivě zvýší viskozita [7].

### 3.1.3 Stanovení času kapilárního sání a vhodného poměru přidávaných flokulantů

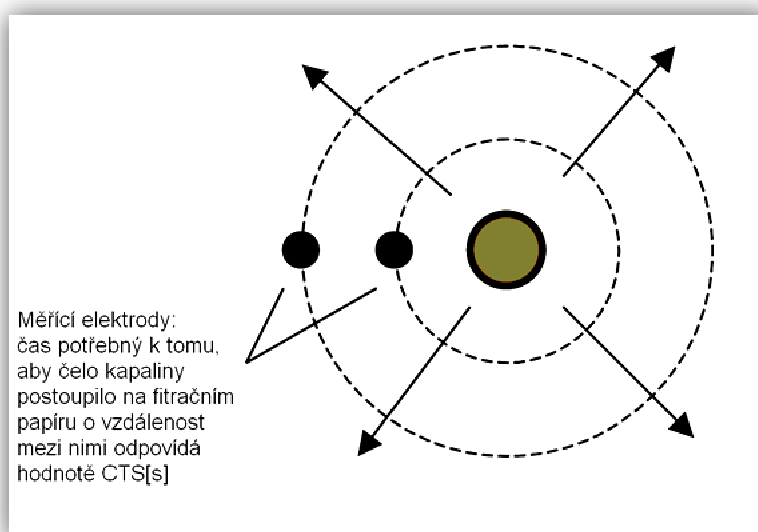
Princip stanovení času kapilárního sání CST dané suspenze spočívá v nahrazení tlakového spádu, potřebného k filtraci přepážkou, sací silou vhodného filtračního papíru, kterým je filtrát sorbován. Rychlost sorpce závisí hlavně na vlastnostech filtračního papíru a filtrovatelnosti kalu.

Vlastní technické uspořádání je poměrně jednoduché. Vzorek kalu se pipetuje do nádoby tvaru dutého válce, jehož dno tvoří filtrační papír. Vlivem kapilárního sání je filtrát ze vzorku odsáván, na papíru uvnitř nádoby se tvoří koláč a vně nádoby postupuje kruhové filtrační čelo. Měří se čas, za který postoupí čelo kapaliny na filtračním papíru o určitou vzdálenost  $l$ . Při odvozování matematických vztahů pro proudění kapaliny filtračním papírem se vychází z těchto předpokladů [8]:

- Makroskopicky pozorovatelný postup čela kapaliny papírem lze nahradit postupem menisku v kapiláře takových efektivních vlastností, aby kapalina postupovala stejně rychle jako na papíru.

- Rychlost postupu kapaliny je zanedbatelná proti rychlosti všech dějů probíhajících mezi stěnou kapiláry a kapalinou
- Nepřehlíží se ke kinetické energii proudící kapaliny
- Hustota vzduchu je zanedbatelná proti hustotě kapaliny.

CST, tedy čas potřebný k tomu, aby čelo kapaliny postoupilo na filtračním papíru o vzdálenost  $l$ , je nepřímo úměrný síle kapilárního sání filtračního papíru. Ta je pro daný filtrační papír konstantní, a proto je CST úměrný odporu, kterým je kapalina zadržována filtračním koláčem.



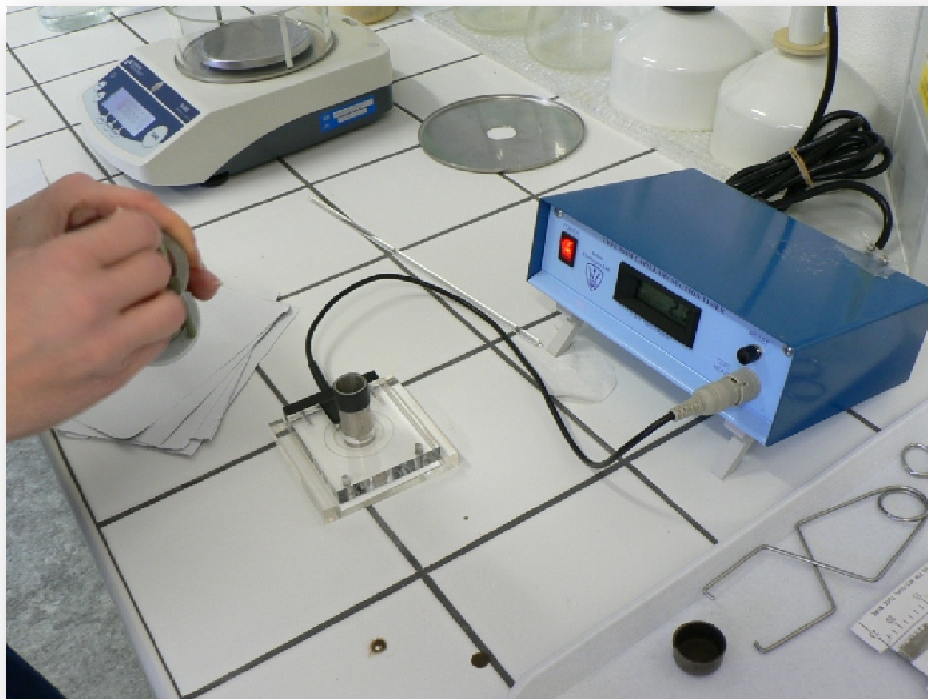
Obr. 3.4 Schéma měření CST

Velikost naměřené hodnoty CST je kromě specifického filtračního odporu ovlivňována ještě řadou dalších faktorů (teplotou, množstvím vzorku, typem filtračního papíru). Jejich vliv je potřeba eliminovat standardizací podmínek měření.

Měření bylo provedeno na přístroji firmy Triton Electronics. Měřící cela je zhotovena z tlustostěnného polymethylmethakrylátu. Má dva díly, mezi které se vkládá filtrační papír. V horním dílu je kruhová zásobní nádobka na vzorek kalu a stabilně upevněné měřicí kontakty. Spodní díl slouží jako základna a nosič filtračního papíru. Z měřící cely jsou vyvedeny kontakty. Spínací zařízení tvoří dva stabilní klopňé obvody, jeden obvod je zapojen jako spínací, druhý jako rozpínací v obvodu elektrických stopek.

Do zásobní nádobky se pipetuje 2 – 5 ml zkoušené suspenze. Vlivem kapilárního sání je filtrát ze vzorku odsáván, což se projeví postupujícím kruhovým filtračním čelem. Ve vzdálenosti nutné k dosažení rovnovážné rychlosti postupu se čelo kapaliny dotkne spínacích kontaktů 1 a vodivě je spojí. Tím se sepne zařízení pro měření času. Čelo kapaliny postupuje dále po filtračním papíru, a jakmile dosáhne třetího kontaktu a vodivě jej spojí s kontakty 1, měření času se zastaví. Takto změřený čas se tedy udává jako čas kapilárního sání CST pro danou suspenzi.

Výslednou hodnotu CST zkoumané suspenze společně s dalšími vzorky obsahující dané množství flokulantu najdeme v tab. 3.2.



*Obr. 3.5 Měřicí přístroj Triton Electronic*

#### **Stanovení vhodného množství přidaných flokulantů**

Pro zlepšení zahušťovací vlastnosti suspenze přidáním polymerního flokulantu je potřeba stanovit optimální dávku flokulantu.

Flokulace je jednou z důležitých operací v oblasti separačních procesů kapalina – tuhá fáze. Využívá se hlavně při výrobě pitné vody a čištění odpadních vod. Účelem flokulace je přeměnit dispergované, běžnými separačními technikami obtížně odstranitelné malé částice na větší agregáty, vločky, které jsou již snadno odstranitelné. Flokulací je možno odstranit i rozpuštěné vysokomolekulární organické látky jejich zachycením do vločky. Flokulace je ovlivňována jak chemickými (např. pH, dávka flokulantu, apod.), tak fyzikálními podmínkami (např. teplota, doba flokulace, lokální hydrodynamické podmínky, atd.) [8].

Se zvyšující se intenzitou míchání dochází v důsledku zvyšujícího se počtu srážek k rychlejší tvorbě a růstu vloček. Na druhou stranu, pokud je míchání příliš intenzivní, dochází vlivem smykových sil k rozbíjení vloček, čímž se snižuje účinnost separace. Dosažení žádané účinnosti separace potom vyžaduje zvýšit množství přidávaného flokulantu, který je drahý a tvoří podstatnou část nákladů na separaci. Hledá se tedy určité optimum, kdy proces probíhá dostatečně rychle, účinně a při minimálních nákladech.





*Obr. 3.6 Promíchávání roztoku s fakulanty*

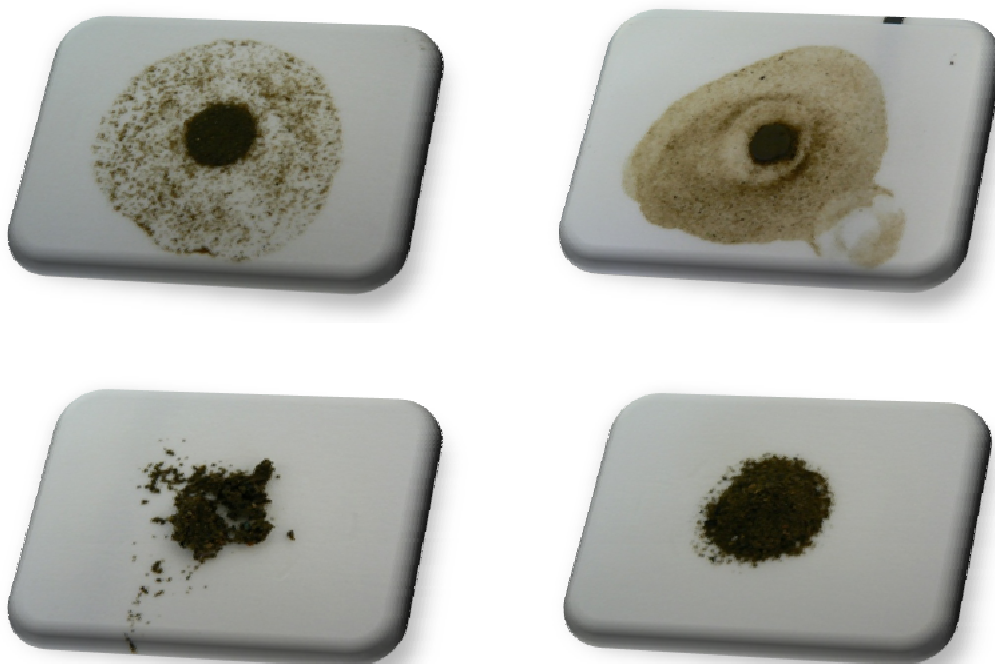
Obsah sušiny v suspenzi je přibližně 7 %. Suspenze byla rozdělena po objemech 50 ml do 4 kádinek. K jednotlivým vzorkům suspenze byla přidána odstupňovaná dávka flokulantu a po promíchání byl změřen CST.



*Obr. 3.7 Jednotlivé vzorky po usazení odstupňované podle množství flokulantu*

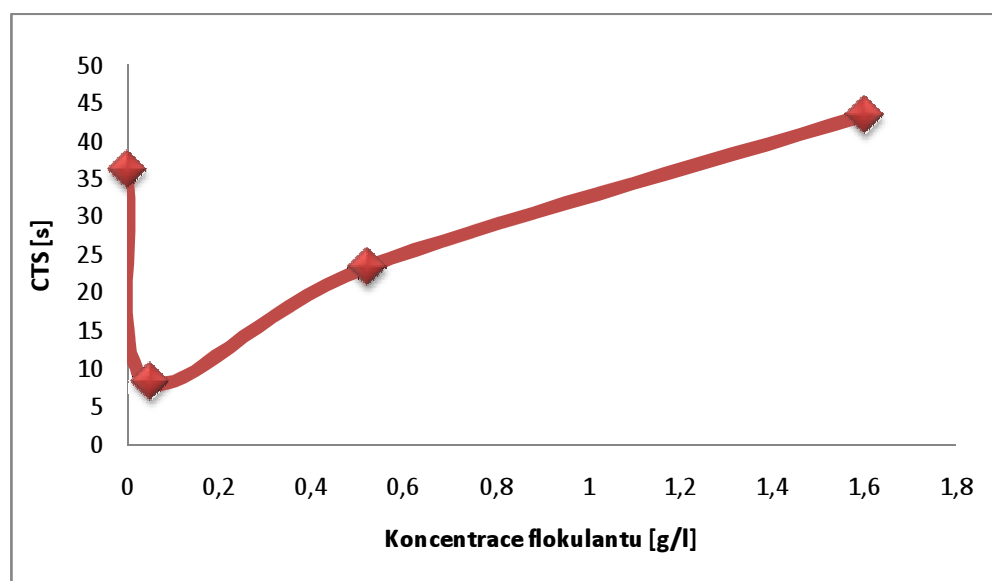
Číslo vzorku	Dávka flokulantu D [mg/l]	CST [s]
1	0	36,2
2	0,05	8,3
3	0,52	23,4
4	1,60	43,4

*Tab. 3.2 Výsledné hodnoty CST pro měřené vzorky suspenzí*



Obr. 3.8 Zachycené pevné částice na filtračním papíru po měření CST odstupňované podle množství flokulantu

Z naměřených hodnot byl sestrojen graf závislosti  $CST=f(D)$  uvedený na obr. 3.8. Z grafu je patrné, že dávka nad 0,52 g/l již nezpůsobuje zlepšení odvodňování suspenze a vizuální kontrola jednotlivých vzorků potvrdila správnost údajů. Pro dokonalé ověření zjištěných informací byla zkouška opakována. Výsledky se shodovaly s prvním pokusem, proto můžeme měření uzavřít se závěrem, že optimální dávka flokulantu je tedy skutečně 0,05 g/l roztoku.



Obr. 3.9 Graf závislosti CST na množství flokulantu

### 3.2 Zjištění granulometrického složení

Základní a výchozí údaj pro vypracování jakéhokoli systému hydraulické dopravy a třídění je granulometrické složení materiálu. Proto byly provedeny detailní rozbor granulometrického složení.

Pomocí sítové analýzy se zjistilo granulometrické složení sušiny odebraného rybníčního bahna. Zkouška se provádí za použití vibračního zařízení, na kterém jsou umístěna na sobě síta. Dole se nachází síto s nejmenší velikostí ok a nahoře s velikostí největší. Materiál z horního síta s největšími rozměry mezer postupně propadá dolů v závislosti na velikosti jednotlivých částic.



*Obr. 3.10 Zařízení pro zjištění granulometrického složení sušiny*

#### **Postup měření**

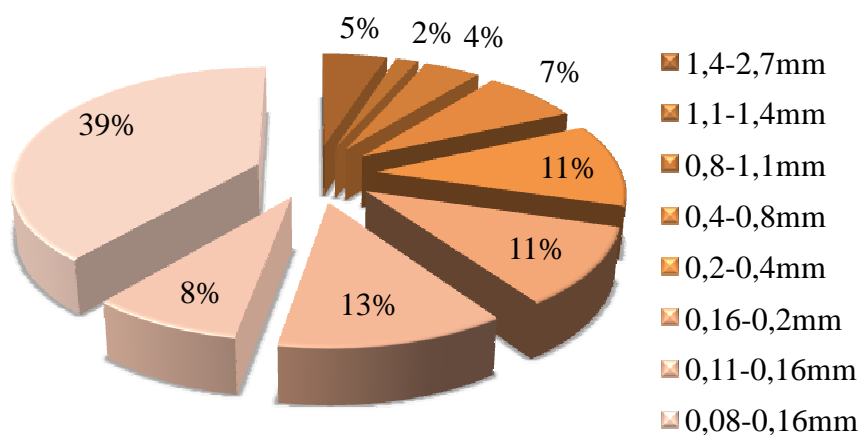
Sušinu získanou ze vzorku bahna nejdříve zhomogenizujeme. Odebereme dostatečné množství homogenní sušiny pro měření, zvážíme ji a umístíme na vrchní síto, které následně zajistíme proti pohybu. Nastavením vibračního přístroje je možné zajistit dostatečnou délku a amplitudu vibrací. V našem případě byla doba třídění nastavena na 5min a amplituda byla pozvolně měněna od nejmenší po největší a následně snižována na opět na minimum. Po ukončení procesu zůstane na každém patře (sítě) určité množství sušiny, která se umístí na váhu a opět zváží.

Zanesením jednotlivých hmotností a rozměrů sít do tabulky (tab. 3.3) získáme přehled o zrnitosti sušiny. Pro lepší znázornění byl sestaven koláčový graf (obr. 3.11) jednotlivých velikostních tříd. Z uvedených výsledků je jasné vidět, že v sušině zkoumané suspenze jsou nejvíce zastoupeny částice s velikostí menší než 0,08 mm (39 %).

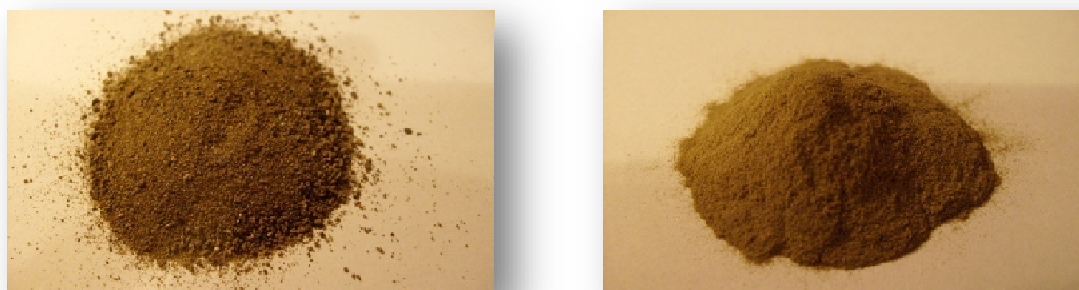
Velikost zrna [mm]	Hmota [%]	Hmota celkově	
		Zůstatek na síť	Proseto
-2.7+1.4	4.89	4.89	100.00
-1.4+1.1	1.63	6.52	95.11
-1.1+0.8	4.25	10.77	93.48
-0.8+0.4	7.39	18.16	89.23
-0.4+0.2	11.51	29.67	81.84
-0.2+0.16	10.65	40.32	70.33
-0.16+0.10	12.51	52.83	59.68
-0.10+0.08	8.33	61.16	47.17
-0.08+0	38.84	100.00	38.84
suma	100.00	-	-

Tab. 3.3 Výsledné hodnoty síťové analýzy

### Granulometrická zkouška



Obr. 3.11 Koláčový graf všech velikostních tříd částic



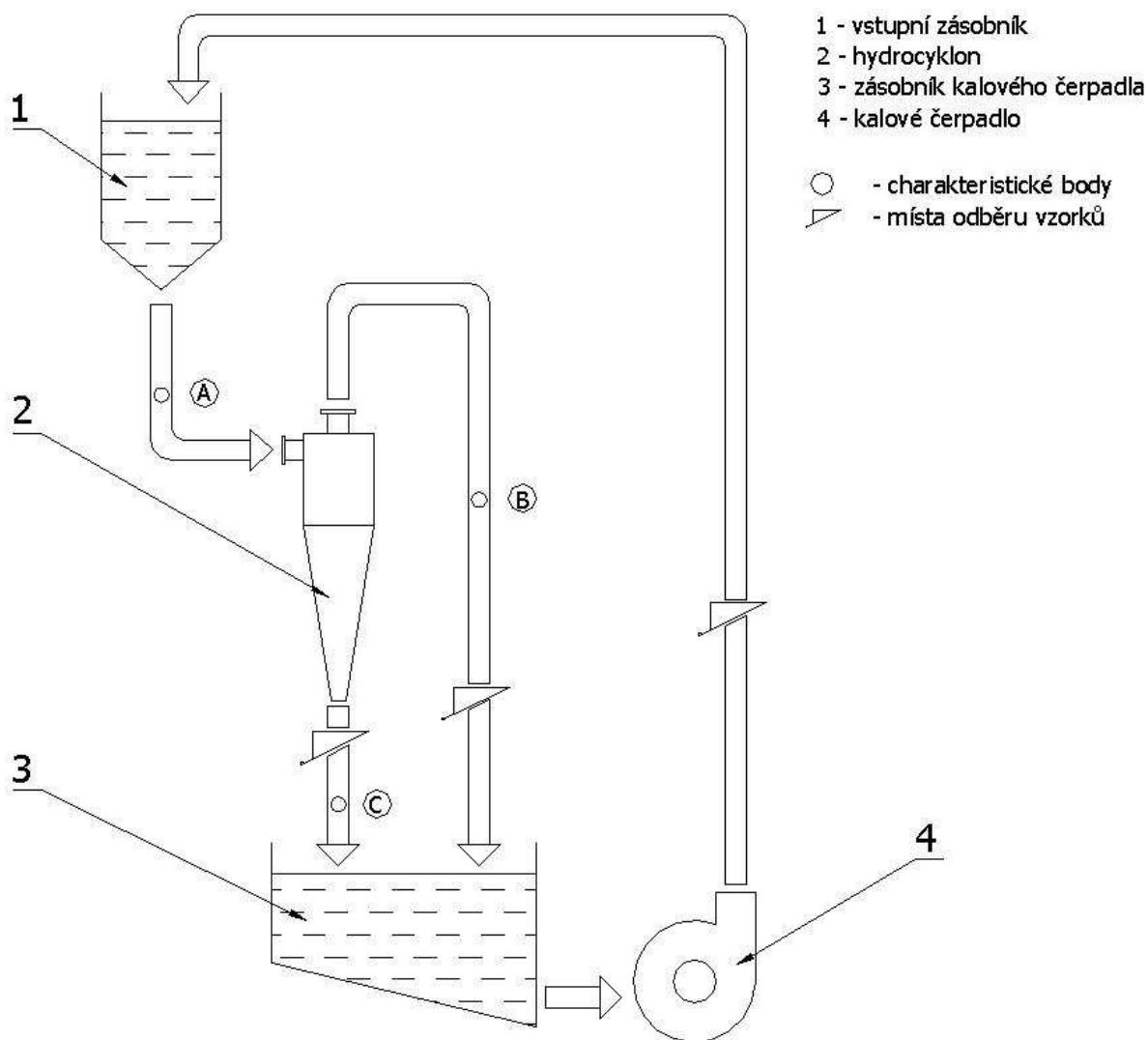
Obr. 3.12 Pohled na zjednodušené velikostní třídy I. a II.

### 3.4 Zkouška odvoditelnosti na laboratorním hydrocyklonu

Pracovní postup byl zvolen takový, že na modelovém zařízení hydrocyklonu byly provedeny požadované varianty úprav zkoumaných zvodněných sedimentů.

Pokusy byly provedeny na modelové aparatuře, která byla vybavena zásobníkem na rmut, šnekovým čerpadlem, manometrem na měření tlaku v hydrocyklonu a zařízením k připojení hydrocyklonového korpusu 19 cm vysokého a o průměru 3,3 cm v horním průřezu s vyměnitelnými tryskami. Vzhledem k charakteru materiálu bylo použito u spodní a výtokové trysky průměru 3 mm a u přepadové trysky průměru 6 mm.

Tyto pokusy probíhaly podle následujícího schématu (viz obr. 3.13).



Obr. 3.13 Schéma způsobu odvodňování pomocí hydrocyklonu

Po odsířování úlomků zetlených rostlin přes síto 2,4 mm byl předem homogenizovaný rmut vpraven do zásobníku hydrocyklonu a po ustálení parametrů za stálé recyklace produktů byly při sledování času odebrány vzorky výtoku a přepadu. Po změření jejich objemu byly usušeny, zváženy a dále předány k dalšímu potřebnému výzkumu.

Schéma dále počítá s použitím hydrocyklonu ve dvou stupních. První stupeň pracuje jako třídič a druhý jako zahušťovač výtoku z prvního stupně.

### **Primární stupeň separace**

Zkouška byla provedena tak, že se po promáčení byla suspenze hnána čerpadlem do měřicího okruhu. Po té se nastavily požadované vstupní parametry: průtok a tlak (1,1 bar). Suspenze (tab. 3.4) vnikající do hydrocyklonu se vlivem odstředivých sil rozdělila. Těžší částice opouštěli hydrocyklon výtokovou tryskou (tab. 3.7) s menším množstvím vody než na vstupu, díky čemuž má výtoková suspenze větší zahuštění. Lehčí částice společně s větším množstvím pracovního média odcházejí tryskou přepadovou (tab. 3.6) a jejich koncentrace je vzhledem k objemu odcházející vody velmi malá (tab. 3.5).

Velikost zrna [mm]	Hmota [%]	Hmota celkově	
		Zůstatek na síti	Proseto
-2.7+1.4	4,45	4,45	100,00
-1.4+1.1	2,63	7,08	95,55
-1.1+0.8	4,25	11,33	92,92
-0.8+0.4	8,39	19,72	88,67
-0.4+0.2	9,89	29,61	80,28
-0.2+0.16	11,46	41,07	70,39
-0.16+0.10	12,81	53,88	58,93
-0.10+0.08	9,93	63,81	46,12
-0.08+0	36,19	100,00	36,19
suma	100,00	-	-

*Tab. 3.4 Granulometrické složení suspenze v nátoku do hydrocyklonu*

Charakteristické body	A	B	C
Množství vody [l]	50	43,497	6,502
Množství sušiny [kg]	3,605	0,910	2,695
Rozdělení hmoty [%]	100,00	25,25	74,75
Procento pevných částic	7,21	2,11	23,67
Hustota pevné části [kg/m <sup>3</sup> ]	2220	2180	2230
Hustota suspenze [kg/m <sup>3</sup> ]	1046	1008	1136
Vstupní tlak [bar]	1,1	-	-

*Tab. 3.5 Výsledné parametry pro odpovídající bod měření*



Velikost zrna [mm]	Hmota [%]	Hmota celkově	
		Zůstatek na síti	Proseto
-2.7+1.4	0,21	0,21	100,00
-1.4+1.1	0,08	0,29	99,92
-1.1+0.8	0,07	0,36	99,85
-0.8+0.4	0,21	0,57	99,64
-0.4+0.2	1,16	1,73	98,39
-0.2+0.16	1,05	2,78	98,17
-0.16+0.10	2,37	5,15	97,32
-0.10+0.08	5,19	10,34	94,95
-0.08+0	89,76	100,00	89,76
suma	100,00	-	-

Tab. 3.6 Granulometrické složení suspenze v přepadu na výstupu z hydrocyklonu

Velikost zrna [mm]	Hmota [%]	Hmota celkově	
		Zůstatek na síti	Proseto
-2.7+1.4	6,39	6,39	100,00
-1.4+1.1	3,21	9,60	93,61
-1.1+0.8	3,42	13,02	90,40
-0.8+0.4	10,38	24,40	86,98
-0.4+0.2	24,76	48,16	76,60
-0.2+0.16	13,75	61,91	51,84
-0.16+0.10	11,69	73,60	38,09
-0.10+0.08	11,93	85,53	26,40
-0.08+0	14,47	100,00	14,47
suma	100,00	-	-

Tab. 3.7 Granulometrické složení suspenze ve výtoku z hydrocyklonu

### Sekundární stupeň separace

Postup měření byl obdobný jako v případě měření v primárním stupni hydroseparace. Jako vstupní suspenze byla použita výstupová směs z výtokové trysky primárního stupně hydroseparace. Tlak byl zvýšen na 1,5 bar.

Charakteristické body	A	B	C
Množství vody [l]	6,502	4,558	1,950
Množství sušiny [kg]	2,695	0,427	2,268
Rozdělení hmoty [%]	100,00	80,85	19,15
Procento pevných částic	23,67	7,09	44,86
Hustota pevné části [kg/m <sup>3</sup> ]	2230	2190	2240
Hustota suspenze [kg/m <sup>3</sup> ]	1136	1039	1320
Vstupní tlak [bar]	1,5	-	-

Tab. 3.8 Výsledné parametry pro odpovídající bod měření

Velikost zrna [mm]	Hmota [%]	Hmota celkově	
		Zůstatek na síti	Proseto
-2.7+1.4	-	-	-
-1.4+1.1	-	-	-
-1.1+0.8	-	-	-
-0.8+0.4	6,53	6,53	100,00
-0.4+0.2	7,78	14,31	93,47
-0.2+0.16	6,53	20,84	85,69
-0.16+0.10	11,36	32,20	79,16
-0.10+0.08	16,92	49,12	67,80
-0.08+0	50,88	100,00	50,88
suma	100,00	-	-

Tab. 3.9 Granulometrické složení suspenze v přepadu na výstupu z hydrocyklonu

Velikost zrna [mm]	Hmota [%]	Hmota celkově	
		Zůstatek na síti	Proseto
-2.7+1.4	5,01	5,01	100,00
-1.4+1.1	3,05	8,06	94,99
-1.1+0.8	3,41	11,47	91,94
-0.8+0.4	11,89	23,36	88,53
-0.4+0.2	26,44	49,80	76,64
-0.2+0.16	17,50	67,30	50,20
-0.16+0.10	13,68	80,98	32,70
-0.10+0.08	9,15	90,13	19,02
-0.08+0	9,87	100,00	9,87
suma	100,00	-	-

Tab. 3.10 Granulometrické složení suspenze ve výtoku z hydrocyklonu

### Zhodnocení výsledků měření

Po důkladném prostudování naměřených hodnot je evidentní, že použití hydrocyklonů v praxi pro odvodňování těžené suspenze je možné. V primární části technologie se podařilo oddělit velkou většinu částic větších než 0,08 mm, jedná se především písek. Sekundární hydrocyklon zahustil na výtoku suspenzi až na téměř 45 % hm. sušiny. Přepadové fáze vycházející z obou hydrocyklonů obsahuje především velmi jemné částice včetně zbytků organických částic.

Naměřené výsledky jsou do značné míry ovlivněny tím, že suspenze byla vytvořena promícháním předem zkoumané sušiny potřebným množstvím vody. Dá se tedy předpokládat, že naměřené hodnoty by při použití suspenze odebrané přímo z vodní nádrže a obsahující živou organiku byly nižší. Zejména výsledky dvoustupňového hydrocyklonování můžou být tímto faktem značně ovlivněny.



## 4 Návrh laboratorní odstředivé a filtrační jednotky

Při posuzování vhodnosti odvodnění zkoumaných materiálů na strojních zařízeních je nutné mít trvale k dispozici zkušební zařízení, které bude mobilní nebo umístěno přímo ve zkušební laboratoři.

Jednotlivé návrhy vycházejí z 3D modelů, které byly vytvořeny v programu Inventor. Zařízení jsou navržena tak, aby na nich mohly být provedeny potřebné zkoušky a jejich obsluha a údržba nebyla náročná.

Laboratorní odstředivá jednotka bude vycházet z jednoduchého hydrocyklonu, který je detailně popsán v kapitole 5. Z tohoto důvodu se návrh bude zabývat pouze laboratorního zařízení jako celku. V druhém případě půjde o návrh filtračního zařízení pracujícího na principu pásového filtru.

Výkresy sestav obou jednotek jsou umístěny v příloze diplomové práce.

### 4.1 Laboratorní hydrocyklonová jednotka

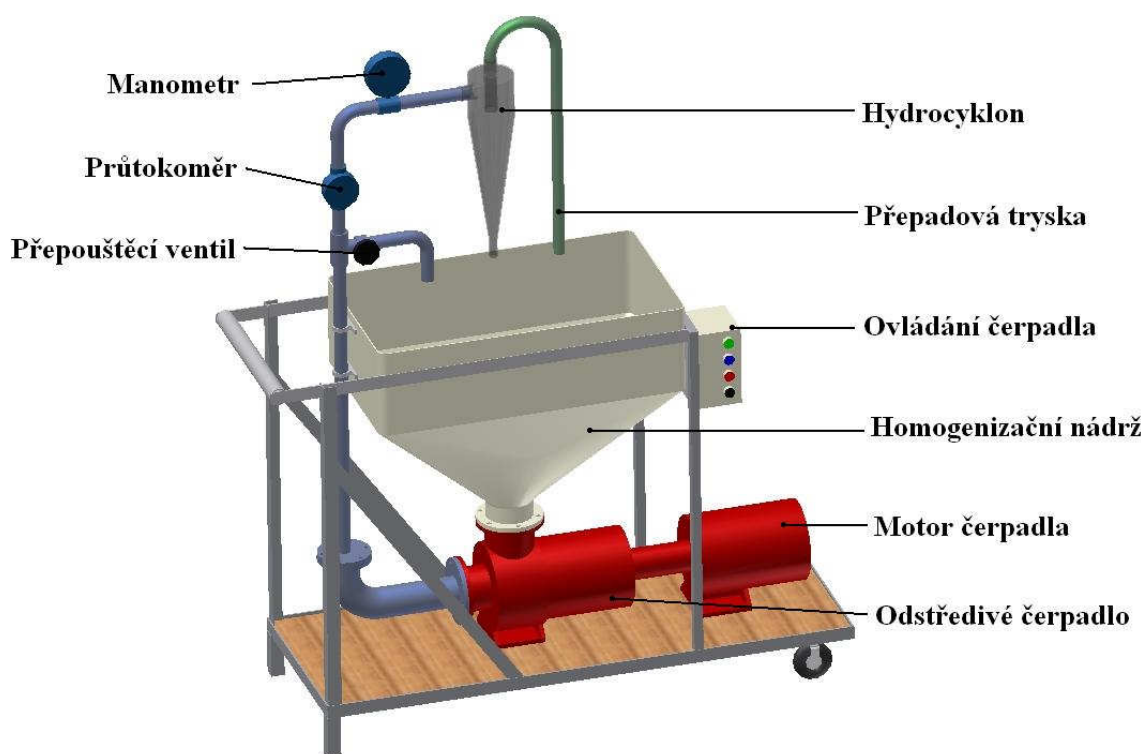
#### 4.1.1 Konfigurace laboratorní hydrocyklonové jednotky

Pro úspěšné měření a zhodnocení vhodnosti hydroseparace použitím hydrocyklonu je nutné mít k dispozici zkušební zařízení. Souprava by měla být jednoduchá spolehlivá a nenáročná na obsluhu. Dále musí být mobilní, aby zkoušky mohly být provedeny v případě potřeby i v terénu přímo u zdroje odvodňované suspenze. Jedinou částí, která odebírá el. energii ze sítě je kalové čerpadlo.

Zkušební jednotka bude obsahovat:

- hydrocyklon s vyměnitelnou výtokovou a přepadovou tryskou
- homogenizační nádrž
- čerpadlo
- armatury pro vedení suspenze
- měřicí přístroje (manometr, průtokoměr)

Soustava bude umístěna v kovovém rámu, na kterém bude i upevněné ovládání čerpadla, jak je tomu na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Konfigurace laboratorního odstředivého zařízení

Do homogenizační nádrže se umístí dostatečné množství suspenze, které bude otvorem umístěným na jejím dně odcházet do okruhu, kde bude čerpadlem hnáno potřebným tlakem. Potrubím se suspenze přivede do nátokové trysky hydrocyklonu, ve kterém se rozdělí na dva proudy. Suspenze obsahující těžší (větší) částice odchází výtokovou tryskou a padá zpět do homogenizační nádrže. Druhá, která obsahuje lehčí frakce, odchází přepadovou tryskou do krátkého potrubí a pak taktéž putuje zpět do nádrže. Před nátokem budou umístěné přístroje na měření tlaku a průtoku. Odběr vzorku pro zhodnocení hydrodynamické separace bude proveden přiložením vhodné nádoby, do které bude proudit určená měřená část suspenze, pod vyústění výtokové nebo přepadové trysky.

Materiál, ze kterého bude vyroben hydrocyklon, může být sklo, tvrzený plast, případně plech. Výběr materiálu je podřízen uvažovaným rozměrům zkušebního hydrocyklonu. V praxi jsou zkušební hydrocyklony velmi malých rozměrů ( $\varnothing$  5 cm) nejčastěji vyrobeny ze skla, jelikož je možné zároveň sledovat proudění uvnitř zařízení a sledovat tvar vzduchového sloupce v ose hydrocyklonu.

Pro dopravu suspenzí do vnitřní trysky hydrocyklonu je použito kalové čerpadlo, které musí být schopno generovat tlak alespoň v rozmezí 0,5 až 2,5 bar.

Samotné měření nám umožní zjistit, zda je suspenze dobře odvoditelná na hydrocyklonu. Dále nám pomůže odhadnout parametry skutečného provozního zařízení (geometrické rozměry, poměr výtokové a přepadové trysky, tlak, ztráty atd.) a umožní nám získat přibližný odhad granulometrické složení sušiny ve výstupech. Předpokládané rozměry jsou 131 x 450 x 60 cm. Předpokládaná hmotnost zařízení je okolo 70 kg.

## 4.2 Laboratorní filtrační jednotka

Pro pochopení některých zákonitostí při filtraci bude uveden krátký úvod do teorie filtrace.

Účelem filtrace je odloučení částeczek pevné fáze od tekutiny, ve které jsou rozptýleny. Suspenze protéká vrstvou porézního materiálu. Při filtraci projde porézní vrstvou tekutina, ale částice se vrstvou zachytí.

Podle mechanismu zachycování pevné fáze můžeme filtraci kapalin rozdělit následovně:

- a) povrchová filtraci
- b) hloubková filtraci

Při povrchové filtraci se využívá prostého síťového efektu. Otvoru v porézní vrstvě jsou zpravidla menší než velikost oddělování částic, které se na porézní přepážce zachycují, zatímco kapalina vrstvou prochází. Tento druh filtrace se uplatňuje při oddělování relativně hrubých částic na sítích při koláčové filtraci i při oddělování velmi jemných částic na membránových filtrech.

Při hloubkové filtraci probíhá separační proces uvnitř filtrační přepážky, přičemž zachycované částice jsou často mnohem menší než póry filtračního materiálu. Tloušťka filtrační vrstvy bývá podstatně větší než při koláčové nebo povrchové filtraci [7].

Hnací silou filtrace je rozdíl tlaků před a za filtrační přepážkou. Ten může být vytvořen:

1. Hydrostatickým tlakem sloupce suspenze – gravitační filtry
2. Čerpadlem nebo tlakem plynu na hladinu suspenze – tlakové filtry
3. Odstředivou silou – filtrační odstředivky

Výtěžek filtrace  $\eta$  je definován jako poměr hmotnosti pevných částic zadržených filtrem  $m_z$  k celkovému množství těchto částic ve filtrované suspenzi  $m$ :

$$\eta = \frac{m_z}{m} \quad (4.1)$$

U dané suspenze bude  $\eta$  záviset především na velikosti pórů filtrační přepážky. Tento činitel je rozhodující u povrchové filtrace, kde rozměr pórů přímo určuje velikost odloučených částic.

Výtěžek filtrace mohou dále ovlivnit pulsace tlaku na filtru, které vznikají např. při čerpání suspenze pístovým čerpadlem bez dostatečně velkého výtláčného vzdušníku. Tyto pulsace mohou narušovat vznikající koláč, a tedy zhoršovat výtěžek filtrace.

Filtrační rychlost  $u_0$  je definována jako objem filtrátu  $dV$ , který protekl jednotkou plochy filtru  $S$  za jednotku času  $dt$ :

$$u_0 = \frac{1}{S} \frac{dV}{dt} = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta p_z}{a_1 v + b_1} \quad (4.2)$$

kde:

- $v$  je objem filtrátu na jednotkovou filtrační plochu [m]
- $\Delta p_z$  je rozdíl tlaků [Pa]
- $a, b$  je konstanty filtrační rovnice [m/s<sup>2</sup>]

Filtrační rychlost charakterizuje zatížení filtru [m/h]. Rychlost, která se může měnit, závisí na způsobu pracovního režimu filtrace. Pohybuje se v rozmezí od 0,03 až 10 m/h. Takto velké rozmezí je dáno řadou faktorů, z nichž rozhodující jsou [11]:

- Vlastnosti filtrátu: na filtrační rychlost má vliv především viskozita, která je závislá na pracovní teplotě
- Vlastnosti suspendovaných částic: velikost, tvar a frakční složení částic
- Vliv tlakového spádu: souvisí s povahou usazeniny a jejím chováním pod vlivem mechanického namáhání. Rozdělují se proto na stlačitelné a nestlačitelné.
- Vliv fyzikálně chemických jevů: projevuje se zejména v usazeninách složených z jemných částic (< 0,01mm)

#### Filtrace za konstantního rozdílu tlaků

Konstantní tlakový spád na filtru je udržován konstantním podtlakem za filtrační přepážkou.

Rovnice filtrační přímky:

$$\frac{dt}{dv} = \frac{a_1}{\Delta p_z} v + \frac{b_1}{\Delta p_z} = av + b \quad (4.3)$$

Závislost jednotkového množství filtrátu na čase  $t$ :

$$t = \frac{1}{2} av^2 + bv \quad (4.4)$$

Závislost filtrační rychlosti  $u_0$  na jednotkovém množství filtrátu:

$$u_0 = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{av + b} \quad (4.5)$$

Filtrační rychlost  $u_0$  na čase:

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{2at + b^2}} \quad (4.6)$$

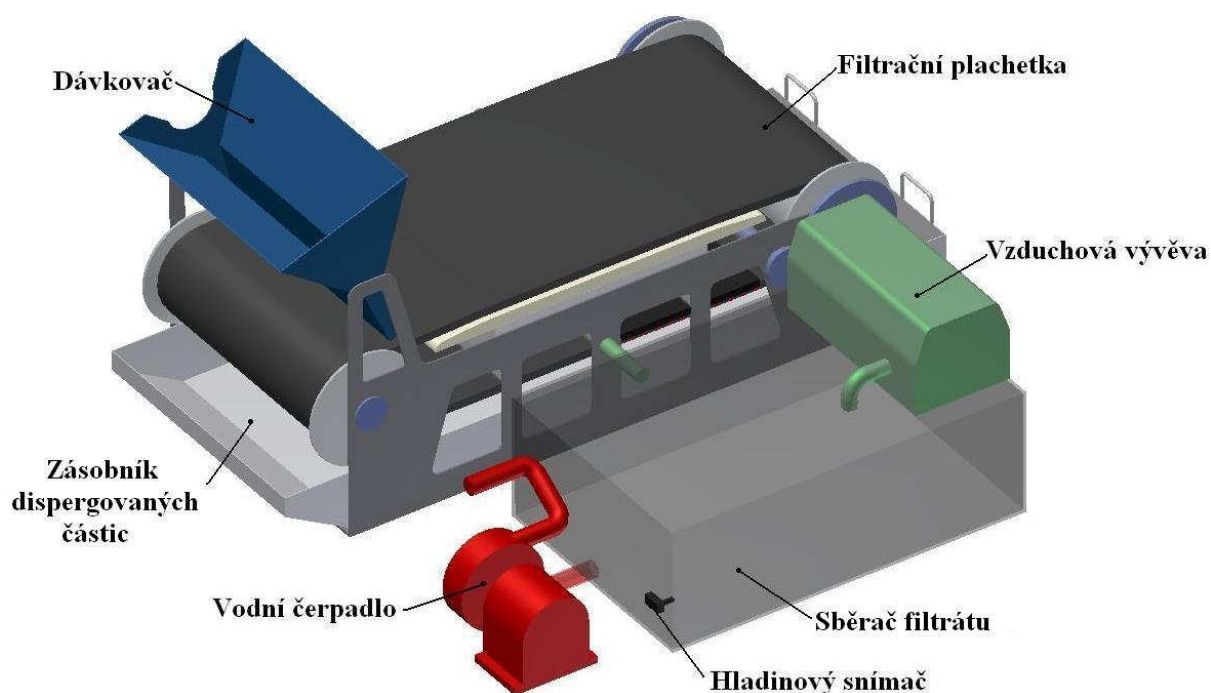
#### 4.2.1 Konfigurace laboratorní filtrační jednotky

Navrhované zařízení bude pracovat na obdobném principu jako pásový filtr, který se běžně používá k odvodnění směsí ve velkých průmyslových aplikacích.

Suspenze se přivede do dávkovače, odkud rovnoměrně vypadává na pás pohybující se pomocí válců. Kapalina obsažená v suspenzi je odsávaná přes filtrační pás do vakuové komory a odtud proudí do sběrače filtrátu. Podtlak je vyvolaný vývěvou. Filtrát se hromadí ve sběrači do té doby, než jeho hladina dosáhne prostoru, který hlídá umístěný snímač. Aby nedošlo k úplnému naplnění sběrače, spustí snímač pomocí vyslaného signálu čerpadlo, které filtrát odčerpá do připravené nádrže.

Odvodněné pevné částice se pohybují pomocí pásu na okraj zařízení, kde po otočení pásu přes válec samy odpadnou vlivem gravitace do zásobníku, nebo jsou odstraněny pomocí shrnovací lišty.

V praxi se běžně filtrační pás po odstranění koláče sprchuje pomocí umístěných trysek. V našem případě, jelikož se jedná o zkušební zařízení, se však trysky na vymytí vyskytovat nebudou.



Obr. 4.2 Konfigurace laboratorní filtrační jednotky

Pásový filtr má ocelový rám, na němž jsou uloženy přední (poháněný) a zadní válec, které nesou a vedou hlavní pryžový dopravní pás filtru, který dále nese látkový filtr.

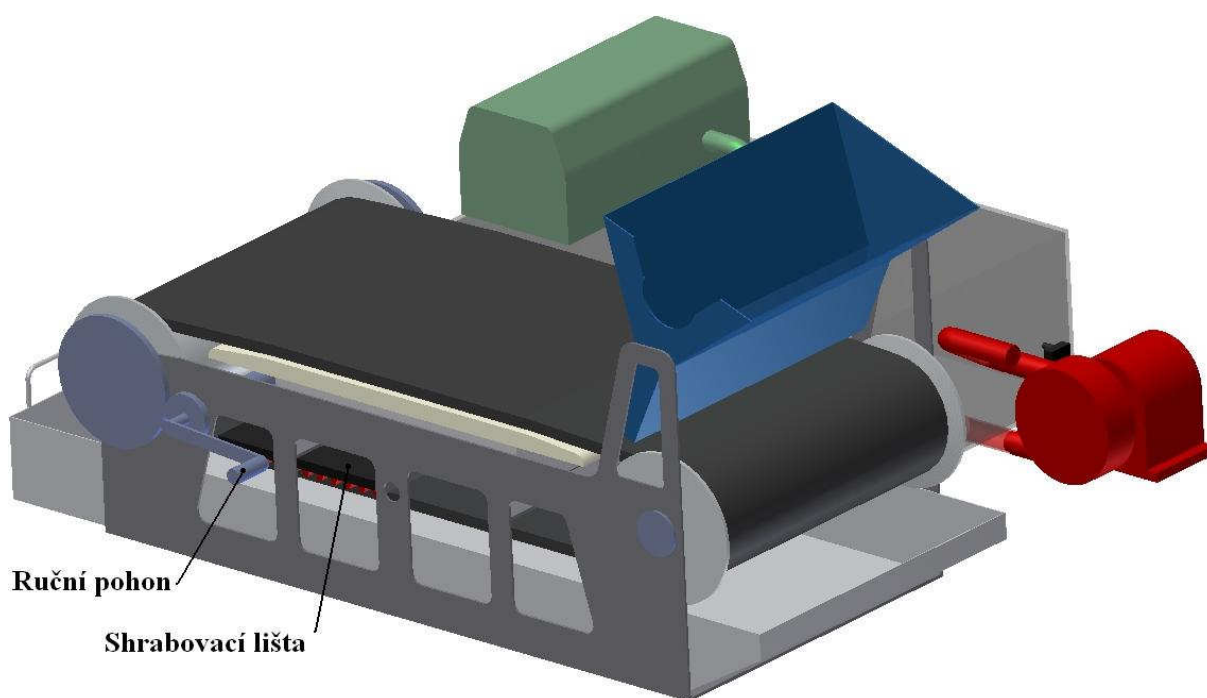
Na rámu je dále uloženo:

- zařízení k vedení a napínání dopravního pásu
- vakuová komora
- poháněcí jednotka
- shrabovací lišta

Těsnění komory bude vyrobeno z polyetylénu a mezi ním a komorou budou ještě gumové pásy. Mezi hlavním dopravním pásem a těsněním vakuové komory je dále těsnicí pás.

Napínání a vedení dopravního pryžového pásu bude dosaženo nastavením ložisek zadního válce, které je pevné a neměl by být důvod k jeho přestavování.

Pohon pásu je v uvažovaném zařízení ruční, v případě potřeb je možné návrh upravit pro pohon strojní včetně možnosti regulace. Regulace udržuje při místním ovládání rychlost pásu na nastavené hodnotě, nebo při automatickém ovládání reguluje rychlost pásu dle tloušťky koláče.



*Obr. 4.3 Konfigurace laboratorní filtrační jednotky (jiný pohled)*

## 5 Návrh technologie pro strojní odvodnění vytěženého sedimentu

Využití hydrodynamické separace při odvodňování vytěžených sedimentů patří ve vodním hospodářství mezi metody relativně nové a dosud hlavně téměř neprojektované. Při úspěšném návrhu by přitom umožňovala kontinuální odvodnění zvodněných sedimentů. Použitím vhodných separačních zařízení by bylo možné rozdělit pevné částice do předem stanovených frakcí a ty následně vhodně využít k jiným účelům nebo finančně zhodnotit.

Během posledních několika let je znám pouze velmi malý počet projektů, při kterých se tato metoda používala. Projekt odbahnění Kyjského rybníka v Praze a separace vytěžených sedimentů za pomoci dekantačních odstředivek skončil nezdarem, jelikož byla problematika mechanického odvodnění značně podceněna.

Na Slovensku momentálně probíhá projekt na odstranění sedimentů ze Slunečních nádrží v okolí Sence. Technologie firmy Technolab, která tuto část projektu zajišťuje, byla navrhována po několik let. Není známo přesné složení této technologie, obsahuje ale dekantační odstředivku od výrobce Flottveg. Z dosud získaných informací vyplývá, že výstup jejich technologie obsahuje až 50 % sušiny při hodnotě 5 až 9% na vstupu do technologie. Je nutné však zdůraznit, že sedimenty Slunečních jezer obsahují velké množství pískových částic a proto je hydrodynamická separace těchto sedimentů méně obtížná.

Technologie strojního odvodnění je nejvhodnější především na místech, kde vybudování sedimentačních lagun není možné. Nejdůležitější část přípravy technologie je provedení důkladného průzkumu dna vodní nádrže nebo rybníku. Zjištěné informace nám dávají představu o charakteristických vlastnostech těženého materiálu. Při návrhu se dále musí počítat s určitými tolerancemi, aby rozsah účinnosti zařízení nebyl vhodný pouze pro jeden daný projekt, ale bylo ho možné využívat s určitými úpravami i na projektech dalších.

### 5.1 Obecný návrh

Cílem níže popsané technologie je dosáhnout co možná největšího obsahu sušiny na jejím výstupu. Dále je snahou rozdělit pevné částice ze dna nádrže alespoň do dvou odlišných frakcí, jednak z důvodů snížení opotřebení koncové dekantační odstředivky a zároveň z možnosti využití odvodněných frakcí k odlišným účelům.

Při návrhu technologie odvodnění sedimentů budeme vycházet z poznatků uvedených v předcházejících kapitolách této diplomové práce.

Víme, že sedimenty jsou těženy pomocí sacího bagru, který pro jejich snadnější dopravu naředí bahno až na 7 % hm. Sací bager je též vybaven zařízením, které zabraňuje vstupu příliš objemných částic do potrubí. Suspenze je kalovým čerpadlem, které je umístěno na sacím bagru, dopravována ze dna vodní nádrže na její břeh, kde je umístěna homogenizační nádrž. Předpokládaný průtok v potrubí je 3m<sup>3</sup>/min. V závislosti na dopravované vzdálenosti je vzhledem k tlakovým ztrátám, možné umístit do technologie dopravy rybníčního kalu vhodné čerpací stanice.

Z homogenizační nádrže se sedimenty budou čerpat do prvního technologického zařízení, kterým je primární hydrocyklon. Vzhledem k velkému objemu suspenze bude použito principu hydrocyklonové baterie, což jsou ve své podstatě čtyři hydrocyklony připojené paralelně na společný přívod dopravené suspenze. V této části odvodňovací technologie je zapotřebí oddělit pokud možno co nejvíce částic větších rozměrů než 1 mm. Jedná se především o písky a drobné kamínky, které nejsou vhodné pro úpravu v dekantací odštědivce. Způsobují totiž velké opotřebení zařízení vlivem velkých abrazivních sil. Tyto částice by se vzhledem ke geometrii hydrocyklonu měly od suspenze odloučit a vypadávat společně s částečným množstvím vody výtakovou tryskou hydrocyklonu. Zbytek suspenze obsahující menší a lehčí částice odchází přepadovou tryskou z primárního hydrocyklonu.

Oddělená suspenze s těžšími frakcemi bude pak čerpadlem vháněna do sekundárního hydrocyklonu, který má za úkol suspenzi zahustit. Dostatečně zahuštěná suspenze opouští hydrocyklon výtakovou tryskou. Jedná se o první výstup z celé odvodňovací technologie. Požadované množství sušiny materiálu je přibližně 50 % v závislosti na složení vstupních sedimentů. Čím menší procento organiky se v sedimentech nachází, tím většího obsahu sušiny je možné dosáhnout. Odvodnělé pevné frakce, které jsou složeny především z písků, jsou dopraveny na místo složení, kde jsou ponechány a připraveny na odvoz nákladními automobily do místa určení. Zbytek z přiváděné suspenze do sekundárního hydrocyklonu je odváděn jeho přepadovou tryskou do druhé homogenizační nádrže.

Ve druhé nádrži bude docházet ke smíchání přepadů z jednotlivých hydrocyklonů. Objem suspenze z přepadu primárního hydrocyklonu bude výrazně větší než objem hydrocyklonu sekundárního. Cílem je opět přivedenou suspenzi dostatečně zhomogenizovat, aby před vstupem do dekantací odštědivky bylo její složení co nejvíce konstantní. Vzhledem k naměřeným hodnotám (kap. 3) očekáváme, že suspenze bude obsahovat přibližně 4 % sušiny.

V dekantací odštědivce bude docházet finálnímu oddělování pevných částic z vytěžené suspenze. Částice se odlučují vlivem působení velkých odštědivých sil, které několika násobně převyšují sílu gravitační. Jeden výstup obsahuje pevné částice, které jsou zbaveny přebytečné vody. Odvodněné bahno je pomocí pásového dopravníku dopravováno na místo složení. Druhý výstup bude odpadní voda

Pro zvýšení výnosů jednotlivých odvodňovacích zařízení je možné vpravit do suspenze polymerní flokulanty. Je však nutné brát v potaz, že odpadní voda z technologie je vypouštěna zpět do vodní nádrže a proto by množství flokulantů mělo být co možná nejmenší.

## 5.2 Klíčové uzly navrhované technologie

Pro navržení důležitých hydroseparačních zařízení je nutné znát teorii, kterou na nich lze úspěšně aplikovat. Jelikož hydrocyklon i odštědivka využívají odštědivých sil, je nutné se před návrhem dostatečně obeznámit s touto problematikou.

Odstředivá síla působí vždy na hmotnou částici, která se pohybuje po zakřivené dráze. Směr působení odštědivé síly je vždy ve směru okamžitého poloměru křivosti.

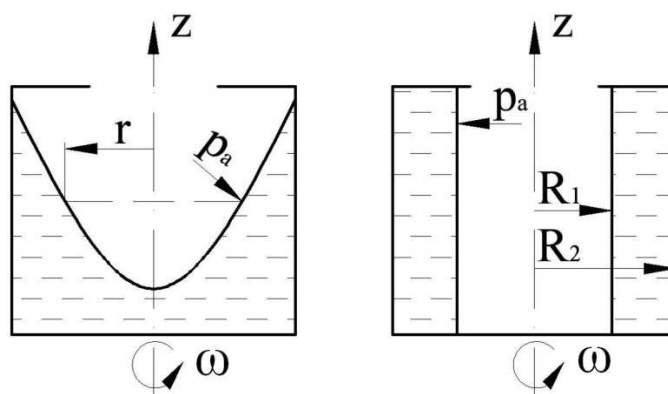


Pro odstředivou sílu  $F_o$  platí:

$$F_o = m \cdot a_o = m \cdot r \omega^2 = \frac{m \cdot u_\varphi^2}{r} \quad (5.1)$$

kde:

- $m$  je hmotnost částice [kg]
- $a_o$  je odstředivé zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
- $r$  je vzdálenost částice od středu rotace [m]
- $\omega$  je úhlová rychlost rotující částice [rad/s]
- $u_\varphi$  je tangenciální složka rychlosti [m/s]



Obr. 5.1 Tvar hladiny v rotující nádobě

Působení odstředivé síly na částici ve spojitém prostředí je vyvoláno rotačním pohybem tohoto prostředí. Jsou známy dva způsoby [14]:

1. Válcová nádoba rotující kolem své osy, která je naplněna kapalinou. Třením mezi stěnami a kapalinou se postupně kapalina uvede do rotace. Po určité době provozu, lze předpokládat, že úhlová rychlost kapaliny a nádoby je totožná. Aparáty využívající tohoto principu jsou označovány jako odstředivky.
2. Do stabilní válcové nádoby je tangenciálně přivedena tekutina, která se vlivem zakřivení válcové plochy dostane do rotačního pohybu. Aparáty využívající tohoto principu jsou označovány jako cyklony. Podle skupenství přiváděné tekutiny se dělí jejich označení na aerocyklony nebo hydrocyklony.

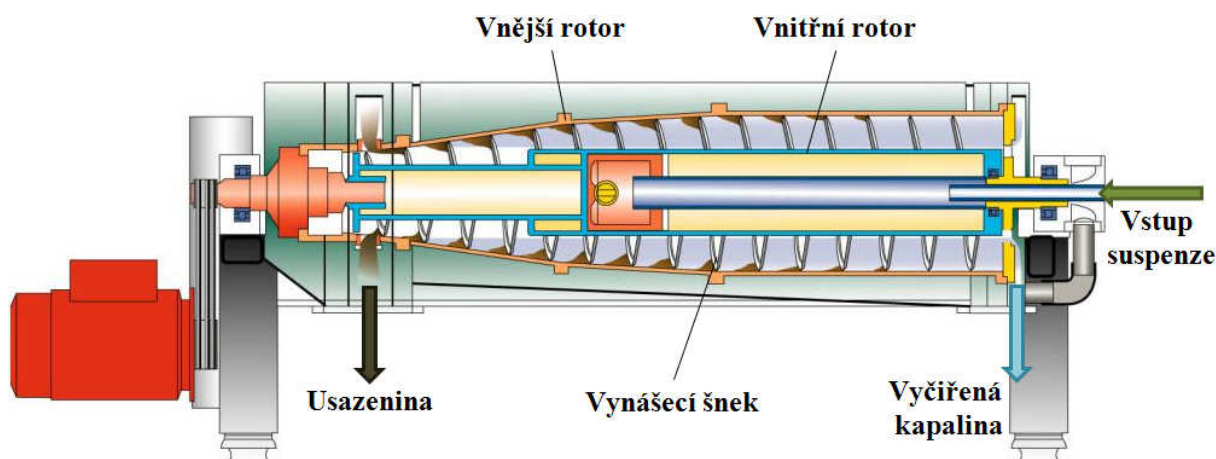
Bez ohledu na způsob vytváření pole odstředivých sil, je možno stanovit účinek odstředivé síly působící na jednotlivé částice a na spojitě prostředí, otáčející se určitou úhlovou rychlostí.

Z rovnice vyplývá, že zvýšení odstředivé síly se snáze dosáhne zvyšováním frekvence otáčení, než zvyšováním poloměru rotace  $r$ . Tento závěr je důležitý pro konstrukční řešení odstředivek.

### 5.2.1 Dekantační odstředivka

V technické praxi se dvojfázové odstředování aplikuje obvykle pro zahuštění, odvodnění, čiření, dělení a třídění s obsahem pevných částic převážně s velikostí  $1\text{ }\mu\text{m} - 5\text{ mm}$  a kalů s amorfními pevnými částicemi s velikostí zhruba do  $5\text{ }\mu\text{m}$ . Pevné částice přitom můžou mít krystalickou, zrnitou či vláknitou podobu.

Dekantační odstředivka, nejčastěji v horizontálním provedení, sestává principiálně z plnoplášťového kuželového nebo cylindrického bubnu, do kterého se asi v jedné třetině délky od užšího konce přivádí ke zpracování určená suspenze (viz obr. 5.1). Ze suspenze se působením odstředivé síly usazují sedimentované částice na vnitřní straně bubnu. Kapalina během odstředování teče bubnem směrem k jeho širšímu konci, kde z něho odtéká přes přepadovou hranu, která obvykle buben na tomto konci částečně uzavírá podobě přepadového mezikruží. Průměr přepadové hrany je vždy poněkud větší než průměr bubnu na jeho protilehlé užší straně. Následkem toho nedosahuje vrstva roztočené kapaliny uvnitř bubnu až k jeho užšímu konci, kde zůstává část vnitřní stěny bubnu, která není kapalinou smáčena. Tuto oblast nazýváme suché pole.



Obr. 5.2 Řez dekantací odstředivkou

Pevné částice, které se z kapaliny usadily na vnitřní stěně bubnu, jsou mechanicky posunovány směrem k užšímu konci bubnu a přes suché pole z bubnu ven. Posun usazených částic se děje šnekem, umístěným souose uvnitř bubnu odstředivky. Šnek se otáčí ve stejném smyslu jako buben odstředivky, avšak poněkud rychleji nebo pomaleji podle toho, je-li šnek pravochoďový nebo levochoďový [12].

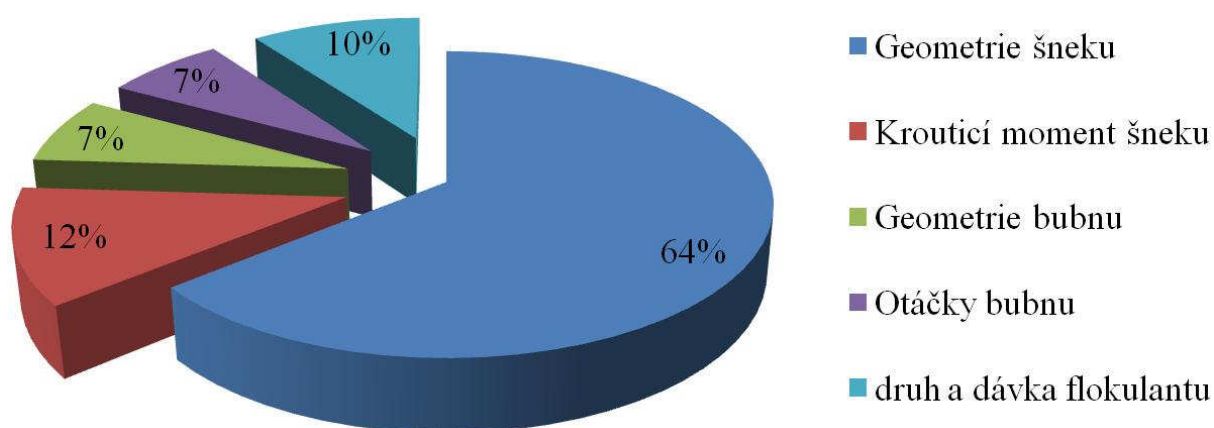
Pro dosažení co nejlepšího oddělování částic ze suspenze je nutné zvýšit odstředivé zrychlení a tedy i zvýšit pracovní otáčky bubnu odstředivky. S tím však souvisí nadměrné namáhání valivých ložisek bubnu a k velkému zatížení vynášecího šneku, který musí posunout sediment. Na ten působí odstředivé zrychlení, odpovídající i několikatisícinásobku zrychlení gravitačního zrychlení. Další nevýhodou zvyšování otáček je značné zvýšení příkonu odstředivky, neboť její příkon roste exponenciálně s otáčkami. Pro zvýšení výkonu odstředování je také vhodná chemická předpraha zpracovávané suspenze například použitím fukulantů.

Z technických parametrů samotné dekantační odstředivky mají pro účinnost procesu (stupeň odvodnění suspenze) největší význam geometrie šneku a geometrie bubnu. Z nastavitelných parametrů mají rozhodující význam otáčky rotoru, krouticí moment šnekového vyhrnováku, zrychlení rotou a otáčky závitovky.

Mezi krouticím momentem a dosaženou sušinou tuhé fáze existuje přímá úměra. Čím vyšší je krouticí moment, tím vyšší je množství sušiny.

Separační účinnost procesu a kvalita fugátu jsou závislé od technického uspořádání odstředivky a způsob řízení procesu resp. Jsou přímo cíleně ovlivňovány změnou základních parametrů separace a dalších intenzifikačních faktorů.

Intenzifikační faktory při odstřeďování je možné zobecnit a procentuálně ohodnotit jak uvádí následující graf (viz obr. 5.2) odstřeďování aerobního kalu s dosaženou sušinou 42 %.



Obr. 5.3 Faktory ovlivňující množství výsledné sušiny

Každý případ zpracování kalů a suspenzí je však velmi specifický a proto je před samotným výběrem a instalací vhodné dekantační odstředivky nutné vykonat potřebné aplikační zkoušky. S tím souvisí i provedení optimalizace procesu, což znamená postupně sladit technické možnosti zařízení a technologická kritéria procesu s kvalitou zpracovávané suspenze. Cílem je při minimální spotřebě polymerního flokulantu dosáhnout nejen vysokého obsahu sušiny sedimentů ale i přiměřenou kvalitu fugátu. Ta musí v mnohých případech přímo odpovídat legislativním a technickým požadavkům.

Z úvodu této kapitoly vyplývá, že teorie dělení směsí v odstředivkách bude vycházet z teorie gravitačního usazování a z teorie filtrace. Avšak pochody probíhající v usazovacích odstředivkách budou složitější než analogické pochody při usazování v gravitačním poli. V odstředivkách namísto tíhové síly, resp. rozdílu tlaků působí síla odstředivá jejíž velikost je závislá na poloměru, a namísto rovinných vrstev kapaliny a usazeniny vznikajících v usazovacích jsou vrstvy utvořené v odstředivkách zpravidla omezené válcovými plochami. Z tohoto důvodu je přesný výpočet odstředivek obtížný a nejspolehlivější podklady pro návrh odstředivky jsou výsledky experimentálních měření na zmenšeném modelu.

### Usazovací rychlost

Při výpočtu doby usazování v odstředivce je třeba znát radiální složku usazovací rychlosti a při jejím odvozování postačí vycházet z podmínky rovnováhy sil v radiálním směru:

$$F_o - F_{ov} - F_r - F_{sr} = 0 \quad (5.2)$$

kde  $F_r$ ,  $F_{sr}$  jsou radiální složky odporové a setrvačné síly,  $F_o$  je odstředivá síla a  $F_{ov}$  je vztlačková síla v odstředivém poli. Coriolisova síla  $F_c$  se v rovnici nevyskytuje, protože působí tangenciálně.

Gravitační síly v odstředivkách jsou ve srovnání se silami odstředivými zpravidla velmi malé, a proto je můžeme zanedbat. V případě částice kulového tvaru o hustotě  $\rho_s$ , usazující se na poloměru  $r$  v kapalině o hustotě  $\rho$  rotující úhlovou rychlostí  $\omega$  platí [7]:

$$F_o = \frac{\pi D^3}{6} \rho_s r \omega^2 \quad (5.3)$$

$$F_{ov} = \frac{\pi D^3}{6} \rho r \omega^2 \quad (5.4)$$

$$F_r = C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{u^2}{2} \rho \quad (5.5)$$

Po dosazení těchto rovnic do rovnice 5.2 získáme pro usazovací rychlost  $u$  vztah:

$$u = \sqrt{\frac{4 D (\rho_s - \rho) r \omega^2}{3 C_D \rho}} \quad (5.6)$$

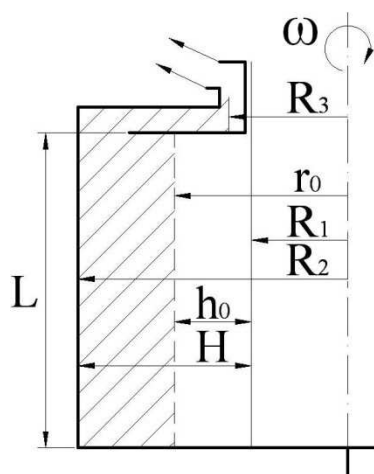
### Výkon kontinuální odstředivky

Při usazování některých jemných suspenzí se tvoří tekutá zahuštěná vrstva. Tuto tekutou usazeninu je možno odvádět nepřetržitě. Polohu rozhraní mezi nepravou usazeninou a vyčeřenou kapalinou lze určit na základě podmínek rovnosti tlaků na obou stranách rozhraní:

$$p_a + \frac{1}{2} \omega^2 \rho (r_o^2 - R_1^2) = p_a + \frac{1}{2} \omega^2 \rho_u (r_o^2 - R_3^2) \quad (5.7)$$

Z této rovnice můžeme vyjádřit poloměr rozhraní  $r_o$ :

$$r_o = \sqrt{\frac{\rho_u R_3^2 - \rho R_1^2}{\rho_u - \rho}} \quad (5.8)$$



Obr. 5.4 Schéma bubnu kontinuálně pracující odstředivky

Objem kapaliny  $V_1$ , který se vyčirí v odstředivce za jednu sekundu, je dán vztahem:

$$\dot{V}_1 = S_o u_{(o)} \quad (5.9)$$

kde  $S_o$  je usazovací plocha v místě rozhraní mezi vyčeřenou kapalinou a zahuštěnou suspenzí a  $u_{(o)}$  je rychlost usazování na tomto rozhraní. Usazovací plochu  $S_o$  lze vyjádřit jako:

$$S_o = 2\pi r_o L \quad (5.10)$$

a rychlost vyčeření lze zjistit například z průběhu usazovacího pokusu na laboratorním zařízení [14].

Vyjádření výkonnosti odstředivky objemem suspenze zpracovaným za jednotku času pro hmotnost tuhé fáze:

$$\dot{V}_{stř} = \frac{\rho_u w_u}{\rho_u w_u - \rho_s w_s} \dot{V}_1 \quad (5.11)$$

Poměr zrychlení  $G$  [-] v odstředivce k zemské gravitaci:

$$G = \frac{\varepsilon^2 \cdot r}{g} = \frac{\pi^2}{g} \cdot \left(\frac{n}{30}\right)^2 \quad (5.12)$$

kde:

-  $\varepsilon$  je úhlové zrychlení [ $\text{rad/s}^2$ ]

Usazovací rychlost  $v$  [m/s] v odstředivce:

$$v = \frac{\rho^k - \rho^v}{18\mu} \cdot G \cdot d^2 \quad (5.13)$$

kde:

- $\rho^k$  je měrná hmotnost částic kalu [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\rho^v$  je měrná hmotnost vody [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\mu$  je dynamická viskozita vody [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
- $d$  je průměr částic [ $\text{m}$ ]

Při určování spotřeby energie k oddělování částic od kapaliny odstřed'ováním platí vzorec:

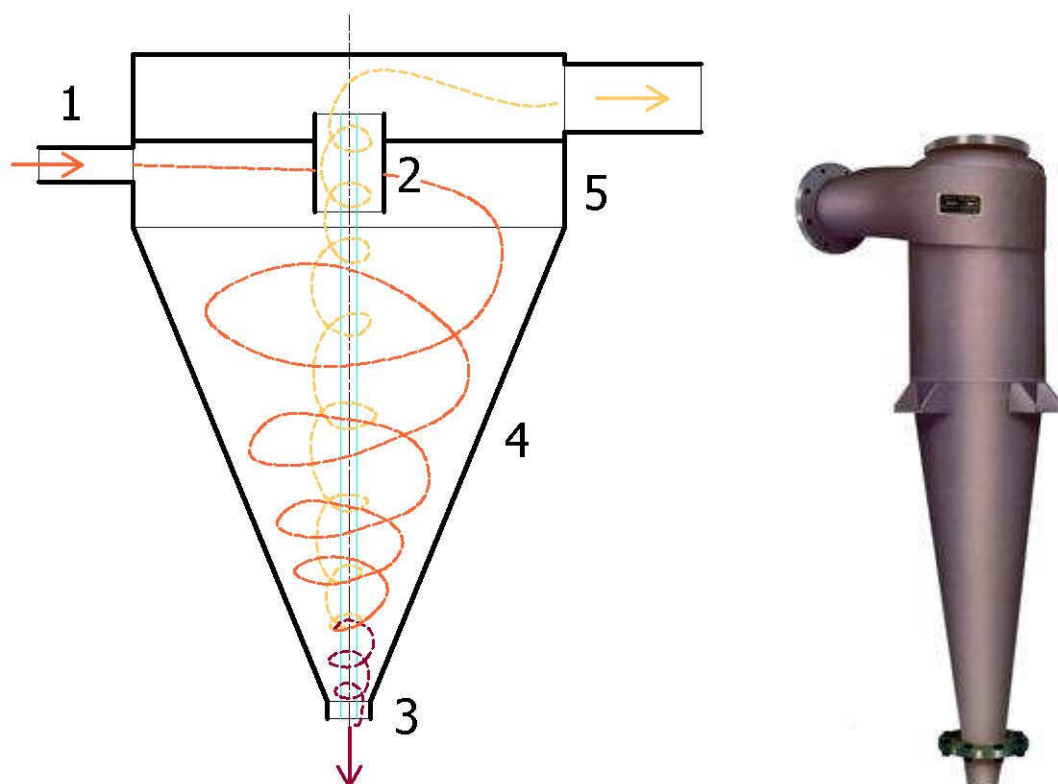
$$G \cdot t_z = k \quad (5.14)$$

kde:

- $G$  je poměr zrychlení [-]
- $t_z$  je doba, po kterou zrychlení působí [s]

### 5.2.2 Hydrocyklon

Hydrocyklon (Liquid-Solid-Cyklon) je zařízení, sestávající se z duté nádoby, do níž je tangenciálně pod tlakem (0,5 - 3,5 bar) uváděna suspenze, která má být rozdružena. Rychlost suspenze ve vstupní trysce bývá zpravidla 3 – 9 m/s.



Obr. 5.5 Schéma proudění a skutečná podoba hydrocyklonu

Nejčastěji používaný typ hydrocyklonu je znázorněn na obr. 5.3. Skládá se z horní části, jež má tvar nízkého válce (5), a ze spodní části (4), jež má tvar kužele obráceného vrcholem dolů. Kapalina proudí do zařízení vstupní tryskou (1). Vlastní rozdružovací efekt je způsoben rychlým kruhovým pohybem suspenze, který je výslednicí tvorby dvou vířivých sil: vnější, jejíž axiální složka proudění směřuje k vrcholu, a vnitřní složka pak ve směru opačném. Těžší pevné částice padají směrem k vnějšímu víru, vznikajícímu působením odstředivé síly a z hydrocyklonu odcházejí výtakovou tryskou (3) společně s podílem kapaliny, zatímco lehčí částice vstupují do víru vnitřního a opouštějí hydrocyklon společně s rovnovážným množstvím vody přes osově umístěný přepad (2) na opačném konci hydrocyklonu. Protože odstředivá síla roste s přiblížením se k ose, lze tento systém považovat za aproximativní vzhledem k volnému víru, což je opak víru nuceného, v němž je odstředivá síla na obvodu právě největší. Potřebný tlak je vyvoláván čerpadlem nebo sloupcem suspenze.

Odstředivé síly působící na tuhé částice procházející hydrocyklonem jsou několikanásobně větší než gravitační síly vyvolávané účinkem tíhového zrychlení. To má rozhodující význam při zpracovávání jemnozrnných surovin a produktů úpravy, u nichž se gravitační způsoby stávají neúčinnými. Se zmenšující se velikostí zrn se totiž zmenšuje vliv přitažlivosti zemské v souvislosti s jejich zmenšující se hmotou, tj. s třetí mocninou jejich průměru, kdežto rušivý vliv hydrodynamického odporu a viskozity prostředí se zmenšuje jen s druhou mocninou průměru zrna.

Pokud by přiváděná suspenze obsahovala jen částice přibližně stejné měrné váhy, projevil by se třídící účinek hydrocyklonu a výtok by obsahoval převážně částice větších rozměrů a do přepadu by se dostávaly jen částice menší. Obdobná analogie funguje i v případě, že v nátoku je suspenze s částicemi přibližně stejných rozměrů a rozdílných měrných vah. Do výtoků pak odcházejí částice specificky těžší a do přepadu lehčí. Protože většina kapaliny přiváděné do hydrocyklonu přechází do přepadu a jen malá část kapaliny odtéká v podobě výtoků spodní tryskou, projevuje se současně i účinek zahušťovací. Z uvedeného vyplývá, že hydrocyklony můžeme využít pro:

- Rozdružování
- Třídění
- Zahušťování

Hydrocyklon patří do skupiny vírových odlučovačů. Při normální funkci hydrocyklonu není celý jeho vnitřní prostor zaplněn proudící suspenzí. Vlivem proudění vzniká v hydrocyklonu podtlak, který vyvolává nasávání vzduchu výtakovou tryskou a též i uvolňování vzduchu pohlceného v přiváděné suspenzi. V blízkosti osy hydrocyklonu se vytvoří mezi výtakovou a přepadovou tryskou podtlakový vzdušný sloupec válcovitého tvaru, který není vyplněn suspenzí. Velikost podtlaku, průměru i tvaru vzdušného sloupce jsou důležitými činiteli, jež ovlivňují funkci hydrocyklonu [11].

Tlak suspenze přiváděný do hydrocyklonu se zpravidla pohybuje v rozmezí 0,4 až 3,5 bar. Jeho velikost je závislá na jeho konstrukci a smyslu použití. Podle velikosti rozdělujeme hydrocyklony:

- Vysokotlaké - vstupní tlak  $p > 20 \text{ mvs}$

- Středotlaké - vstupní tlak  $p = 5 - 20$  mvs
- Nízkotlaké - vstupní tlak  $p < 5$  mvs

Tvar a konstrukce hydrocyklonu jsou podmíněny jeho použitím. Zahušťovací, třídící a rozduřovací hydrocyklony se od sebe liší průměrem a výškou válcové součásti, výškou kuželové části, průměrem vstupní, přepadové a výtokové trysky a některými dalšími konstrukčními prvky.

V praxi se uplatňují nejčastěji hydrocyklony o průměru 100 - 500 mm. Jen výjimečně se používá hydrocyklonu s větším průměrem. To vyplývá především ze vzájemné závislosti vstupní rychlosti na průměru. Čím větší je průměr, tím větší musí být i rychlost proudění suspenze ve vstupní trysce. Proto pro zvýšení výkonnosti hydrocyklonu nezvětšujeme libovolně jeho průměr, ale je nutno spojit několik hydrocyklonů vhodných rozměrů paralelně do baterií (obr. 5.4).



Obr. 5.6 Baterie hydrocyklonů

Důležitým činitelem majícím vliv na celý děj odehrávající se v hydrocyklonu je jeho vrcholový úhel kónické části. Vedle štíhlých hydrocyklonů s vrcholovým úhlem  $10^\circ$  nebo  $15^\circ$  se používají i úhly  $60^\circ$  až  $75^\circ$ . Nejčastěji se však používá vrcholový úhel v rozmezí  $20^\circ$  až  $30^\circ$ .

Předností hydrocyklonu je jednoduchost, velmi dobrý třídící, zahušťovací nebo rozduřovací účinek a velká výkonnost. V porovnání s třídíči založenými na gravitačním usazování malé rozměry a tím i malá potřeba místa. K nedostatkům patří spotřeba el. energie potřebná pro pohon čerpadla dopravující suspenzi do vstupní trysky.

Konstrukční jednoduchost hydrocyklonu vyplývá z toho, že nemá pohybující se součásti, jež by podléhaly rychlému opotřebení. Přesto však dochází k opotřebení čerpadel, spodní části



kužele a výtokové trysky. V rámci prodloužení životnosti hydrocyklonu a jeho jednotlivých součástí se používá místo obyčejné litiny speciální slitiny s vysokým obsahem niklu, nebo se vnitřek chrání pryžovým vyložením s vložkami z taveného čediče.

### Průběh proudění v hydrocyklonu

Proudění suspenze procházející hydrocyklonem je velmi složité. Pochopení reálného průběhu vířivého proudění v hydrocyklonu je ztíženo především tím, že statické tlaky v proudění se mění velice rychle a jsou těžko měřitelné.

Rychlost pohybu kapaliny v libovolném místě hydrocyklonu je výslednicí:

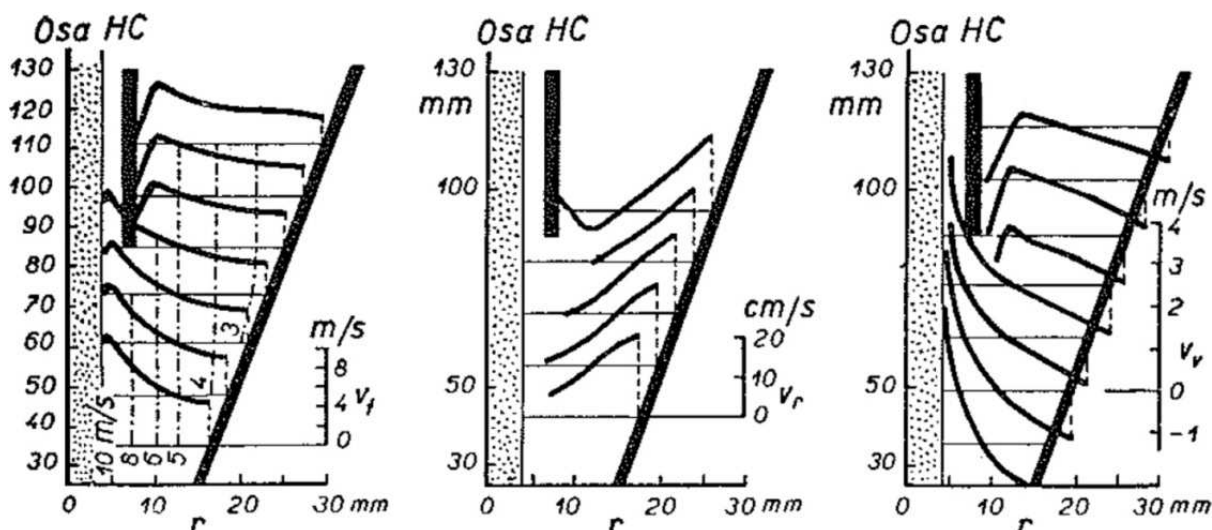
1. Tangenciální rychlosti -  $u_\varphi$  směřuje kolmo k poloměru kroužení  $r$  zvoleného bodu ve vodorovné rovině
2. Radiální rychlosti -  $u_r$  směřuje ve směru poloměru  $r$  zvoleného bodu
3. Vertikální rychlosti -  $w$  je kolmá k oběma předcházejícím rychlostem

Je-li vertikální rychlost  $w = 0$ , je výsledná rychlost pohybu c libovolného bodu ve zvolené rovině výslednicí tangenciální a radiální rychlost:

$$c = \sqrt{u_\varphi^2 + u_r^2} \quad (5.15)$$

Označíme-li úhel, který svírá směr proudění kapaliny s poloměrem kroužení  $r$  jako  $\alpha$ , je:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u_\varphi}{u_r} \quad (5.16)$$



Obr. 5.7 Průběh tangenciální, dostředivé a svislé rychlosti v hydrocyklonu [11]

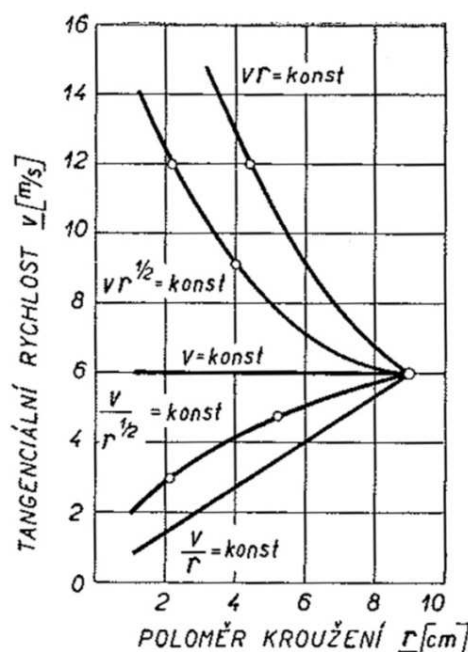
Odstředivá síla je způsobená rotačním pohybem nosného média vstupujícího tangenciálně v horní válcové části hydrocyklonu. Odstředivá síla způsobí radiální pohyb částic ve směru od

osy cyklonu směrem k jeho stěně. Rotační pohyb je charakterizován úhlovou rychlostí  $\omega$ , respektive tangenciální složkou rychlosti  $u_\varphi$ . Maximální hodnota odstředivého zrychlení bude na stěně hydrocyklonu a jeho hodnota bude klesat směrem k jeho ose.

$$F_o = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_t \cdot \frac{u_{\varphi r}^2}{r} \quad (5.17)$$

kde:

- $\rho_t$  je hustota pevné částice
- $d$  je průměr pevné částice
- $r$  je vzdálenost částice od osy hydrocyklonu



Obr. 5.8 Závislost tangenciální rychlosti na poloměru kroužení v různých vzdálenostech od vstupní trysky

Odporová síla, bránící pohybu částice v radiálním směru od osy hydrocyklonu ke stěně je způsobena reálnými vlastnostmi nosného proudu. Zavádíme proto předpoklad, že veškerý objemový průtok nosného média vytvoří radiální průtok tekutiny od stěny cyklonu ke středovému vzestupnému proudu. Takto vzniklá radiální složka rychlosti působí proti směru radiálního pohybu vzniklého od odstředivé síly a brání tedy částici v usazení. Výsledná radiální složka rychlosti působící na částice bude tedy rovna rozdílu rychlostí od odstředivé síly a rychlosti, kterou je částice vynášena obtékáním nosným médiem.

$$F_r = \frac{1}{2} \xi_o \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho (u_r - u_{ro})^2 \quad (5.18)$$

kde:

- $u_r$  je radiální složka rychlosti nosného media [m/s]
- $u_{ro}$  je radiální složka rychlosti způsobená odstředivou silou [m/s]
- $\xi_o$  je odporový součinitel  $\xi_o = f(Re)$  [-]

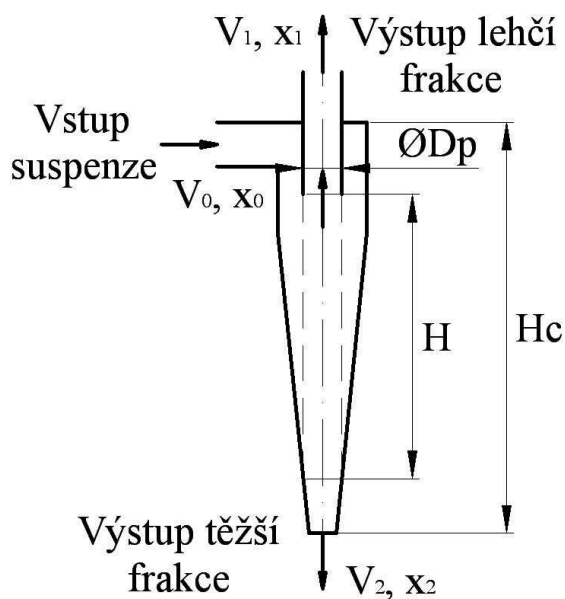
Gravitační síly jsou vzhledem k silám odstředivým zanedbatelné. Jejich význam spočívá v tom, že působí na částice, nacházející se v mezní vrstvě na stěně hydrocyklonu a napomáhají jejich transportu do jeho spodní kuželové části. Jejich směr je kolmý na směr působení odstředivých a odporových sil a v silových bilancích se neuvažují.

Vztlakové síly v odstředivém poli mohou být uvažovány. Jejich působením se snižuje hodnota odstředivé síly.

$$F_{Vo} = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho \cdot \frac{u_{\varphi r}^2}{r} \quad (5.19)$$

kde:

- $\rho$  je hustota pracovního média



Obr. 5.9 Schematické znázornění materiálové bilance hydrocyklonu

Pro celkovou materiálovou bilanci hydrocyklonu platí:

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (5.20)$$

Pro bilanci pevné fáze platí:

$$\dot{V}_0 x_0 = \dot{V}_1 x_1 + \dot{V}_2 x_2 \quad (5.21)$$

Tlakové ztráty v hydrocyklonech:

$$\Delta p = \xi_{HC} \cdot \frac{u_H^2}{2} \rho \quad (5.22)$$

Reynoldsovo kritérium:

$$Re_{HC} = \frac{u_H \cdot D_p \cdot \rho}{\eta} \quad (5.23)$$

kde  $u_H$  je charakteristická rychlost, která se volí jako rychlost v přepadové trysce  $D_p$  [7].

### **Konstrukční prvky hydrocyklonu**

Funkce hydrocyklonů a jimi dosahované výsledky při zahušťování, třídění nebo rozduřování závisí jednak na jejich konstrukčních parametrech a jednak i na některých dalších faktorech, jako je například velikost vstupního tlaku, zahuštění a viskozita zpracovávané suspenze.

Základní konstrukční prvky, které mají vliv na chod hydrocyklonu:

- průměr hydrocyklonu
- Vrcholový úhel kuželové části hydrocyklonu
- Průměr vstupní trysky
- Průměr přepadové trysky
- Průměr výtokové trysky
- Výška válcové části hydrocyklonu
- Výška kuželové části hydrocyklonu
- Umístění vstupní trysky
- Hloubka ponoru přepadové trysky a její tvar

V praxi se nejčastěji používají hydrocyklon s průměrem 100 – 500 mm. Jedná se o rozhodující činitel, především pokud jde o výkonnost hydrocyklonu a má také vliv na složení produktů. S průměrem hydrocyklonu, tj. s průměrem jeho válcové části, souvisí také i délka této části. U pracích hydrocyklonů bývá délka válcovité části větší a blíží se někdy velikosti jejího průměru. U třídících a odkalovacích hydrocyklonů má být výška válcovité části pokud možno malá.

Má-li být zpracováno větší množství materiálu, nelze libovolně zvětšovat průměr hydrocyklonu a je nutno problém řešit tak, že se potřebný počet vhodného typu a velikosti spojuje paralelně do bateriových cyklonů. Bateriové hydrocyklony zahušťovací a odkalovací mívají 10 – 20 cyklonů.

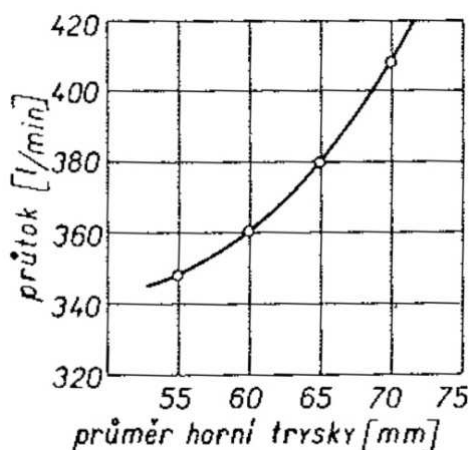
Vrcholové úhly hydrocyklonu bývají nejčastěji 20 – 30°. Čím menší je vrcholový úhel, tím menší je dělicí velikost zrna a tedy se do přepadu dostávají jemnější částice. Hydrocyklony s malými vrcholovými úhly vyžadují přiměřeně zvýšenou vstupní rychlost a pracují proto s většími tlaky než hydrocyklony s většími vrcholovými úhly [11].

Rozhodující vliv na chod hydrocyklonu a složení přepadu i výtoku má průměr přepadové a výtokové trysky a jejich vzájemný poměr. Přepadová tryska bývá buď pevně spojena s krycí deskou válcovité části hydrocyklonu, nebo bývá vyměnitelná, aby bylo možno přizpůsobit její velikost konkrétním provozním podmínkám. Pokusně nebo početně zjištěná optimální velikost přepadové trysky se již v provozu nemění. Na rozdíl od toho bývá u některých typů hydrocyklonů žádoucí, aby bylo možno během provozu zužovat nebo rozšiřovat trysku výtokovou. To vyplývá z toho, že průměr výtokové trysky má velmi značný vliv na jakost obou produktů, kdežto vliv přepadové trysky je podstatně menší a projevuje se význačně jen na objemovém množství produktu vycházejícího přepadovou tryskou. Závislost průtokového množství procházejícího přepadovou tryskou na jejím průměru je znázorněna na obr. 5.7. Příslušné hodnoty byly zjištěny u rozdužovacího hydrocyklonu o průměru 250 mm s vrcholovým úhlem 60°. Velikost vstupní trysky byla 55 x 23 mm, průměr výtokové trysky 30 mm a vstupní tlak 0,8 bar.

U přepadové trysky je důležité, aby její spodní okraj byl o něco níže, než je spodní okraj vstupní trysky. Není-li tomu tak, pak může nastávat tzv. zkratové proudění od vstupní trysky přímo k trysce přepadové, čímž by se podstatně zhoršily výsledky.

#### **Vliv velikosti vstupní, přepadové a výtokové trysky na chod hydrocyklonu**

Na rozdělení tuhých částic do přepadu a výtoku může mít ve značně širokých mezích vliv tvar hydrocyklonu a velikosti trysek. Vzájemný poměr průměrů těchto trysek i poměr velikosti jednotlivých trysek k průměru hydrocyklonu není libovolný a může být proto měněn jen v jistých mezích. Přitom změna každého z těchto parametrů mění výrazně průběh a výsledky zahušťování, třídění nebo rozdužování v hydrocyklonech.



Obr. 5.10 Závislost výkonu hydrocyklonu na průměru přepadové trysky

V literatuře se uvádí vztah sestavený na základě pokusů J. J. Modera a D. A. Dahlstroma jako:

$$a \cdot D = 2d_{vst} + d_p \quad (5.24)$$

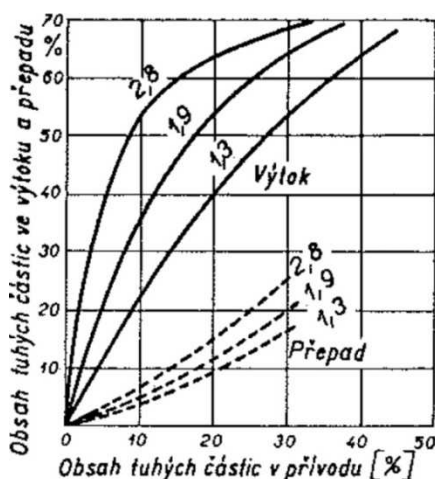
kde:

- **a** je pokusně stanovený koeficient, jehož hodnota je přibližně 0,5
- **D** je průměr válcovité části hydrocyklonu
- **d<sub>vst</sub>** je průměr vstupní trysky
- **d<sub>p</sub>** je průměr přepadové trysky

Podle Modera a Dahlstroma je pak optimální poměr průměru přepadové trysky k průměru vstupní trysky 1:1 až 2:1 [11].

Jak vyplývá z toho, co bylo dosud uvedeno, je průměr výtokové trysky rozhodujícím činitelem majícím vliv na chod hydrocyklonu. Proto musí být hydrocyklon konstruován tak, aby výtokové trysky mohly být bez obtíží a pokud možno rychle vyměněny. Výměna výtokové trysky je nutná nejen při zkouškách prováděných k zjištění jejího optimálního průměru, ale i při jejím opotřebení nebo poškození. Opotřebením zvětšený průměr výtokové trysky se projevuje tak, jako kdyby byla nahrazena tryskou většího průměru. Tím se změní jakost a složení přepadu i výtoku.

Jakost produktů vycházejících z hydrocyklonu v neposlední řadě také závisí na obsahu tuhých částic v přívodu a velikosti vstupního tlaku. Na obr. 5.8 je znázorněna závislost obsahu tuhých částic přívodu při různém poměru průměru přepadové trysky k průměru trysky výtokové.

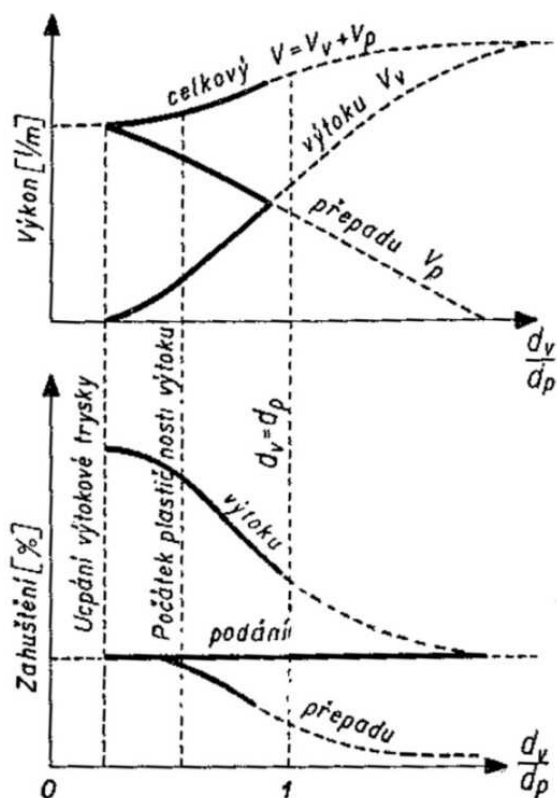


Obr. 5.11 Závislost obsahu tuhých částic ve výtoku a přepadu na jejich obsahu v přívodu

Z diagramu vyplývá, že obsahoval-li přívod zahušťovacího hydrocyklonu 20 % objemových tuhých částic, byl by při poměru trysek  $d_p/d_v = 1,3$  obsah tuhých částic ve výtoku 40 % a obsah tuhých částic v přepadu 10 %. Naproti tomu kdyby byl poměr trysek  $d_p/d_v =$

2,8, bylo by zahuštění výtoku 63 % a obsah tuhých částic v přepadu 15,5 %. Přitom se současně mění i váhové výnosy obou produktů.

Závislost zahuštění produktů a výkonnosti zahušťovacího hydrocyklonu na poměru velikosti výtokové trysky k velikosti trysky přepadové znázorňuje obr. 5.9.



Obr. 5.12 Vliv velikosti výtokové trysky na zahuštění a na výkon hydrocyklonu

Z diagramu je patrné, že zvětšuje-li se poměr  $d_v/d_p$ , zvětšuje se množství výtoku  $V_v$  a zmenšuje se množství přepadu  $V_p$ . Přitom celkové průtočné množství suspenze procházející hydrocyklonem  $V = V_v + V_p$  rovněž poněkud vzrůstá. Současně se zmenšuje zahuštění výtoku a nepatrně i zahuštění přepadu.

Při velmi malém otvoru výtokové trysky je množství výtoku rovněž velmi malé a výtok nestačí odvádět všechny částice většího průměru. Z toho vyplývá, že tyto částice začínají odcházet ve větším množství do přepadu a zčásti se začínají hromadit poblíže vrcholu kužele. Zahuštění výtoku se stává tak velkým, že se přibližuje hranici plastičnosti a místo obvyklého vějířovitého výtoku pozorujeme nerotující proud vytékající celým průřezem trysky.

#### Stanovení výkonnosti hydrocyklonu

Výkon závisí na řadě veličin, z nichž nejdůležitější je průměr vstupní, přepadové a výtokové trysky, vrcholový úhel kužele a vstupní tlak. Vzhledem k již uvedeným vztahům je patrné, že výkon hydrocyklonu je i nepřímo úměrný jeho průměru.

Z existujících vztahů asi nejlépe popisuje závislost výkonu hydrocyklonu na jeho parametrech Battagliův vzorec:

$$V_z = \left( a + \frac{b}{c + tg \frac{\varphi}{2}} \right) \cdot d_p \cdot d_{vst} \sqrt{\frac{1 - \frac{d_p}{D} \cdot \Delta p}{\left( \frac{d_p}{d_{vst}} + 1 + \frac{d_{vst}}{d_p} \right) \cdot \gamma}} \quad (5.25)$$

kde:

- $V_z$  je charakteristická výkonnost hydrocyklonu [l/min]
- $D$  je průměr válcovité části hydrocyklonu [mm]
- $d_{vst}$  je ekvivalentní průměr vstupní trysky [mm]
- $d_p$  je průměr přepadové trysky [mm]
- $\varphi$  je vrcholový úhel kónické části hydrocyklonu
- $\Delta p$  je ztráta tlaku v hydrocyklonu [atm]
- $\gamma$  je měrná váha suspenze [g/cm<sup>3</sup>]
- $a, b, c$  jsou konstanty

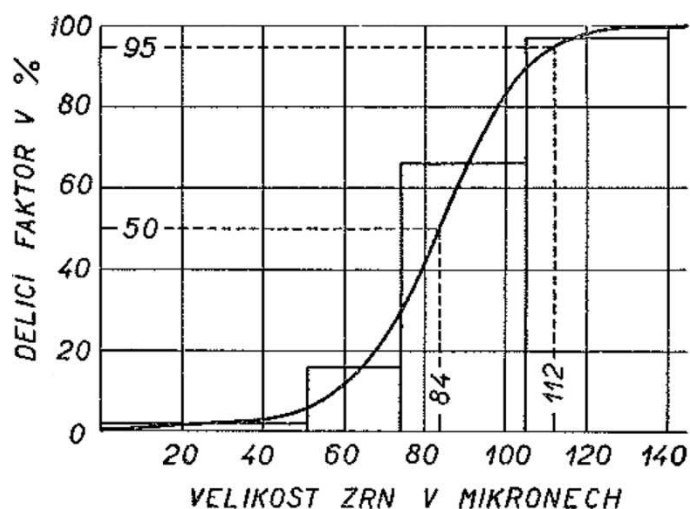
Z popisu činnosti hydrocyklonu vyplývá, že uvnitř zařízení dochází ke složitému prostorovému proudění nosného média, unášejícího pevné částice. Pro vlastní návrh hydrocyklonu se vychází z určitých zjednodušujících podmínek a výsledné řešení se násobí empirickými konstantami. Vedle geometrického uspořádání hydrocyklonu se při návrhu stanoví mezní velikost částice  $d_m$ , která se v cyklonu ještě odloučí od nosného média. Částice větší než tento rozměr se odloučí a usadí na stěně hydrocyklonu a dostanou se postupně do jeho spodní části. Menší částice jsou vyneseny středovým proudem mimo hydrocyklon.

$$d_m = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot u_r}{\rho_t \cdot u_\varphi^2}} \cdot r \quad (5.26)$$

kde:

- $r$  je vzdálenost místa změny radiální složky rychlosti na axiální





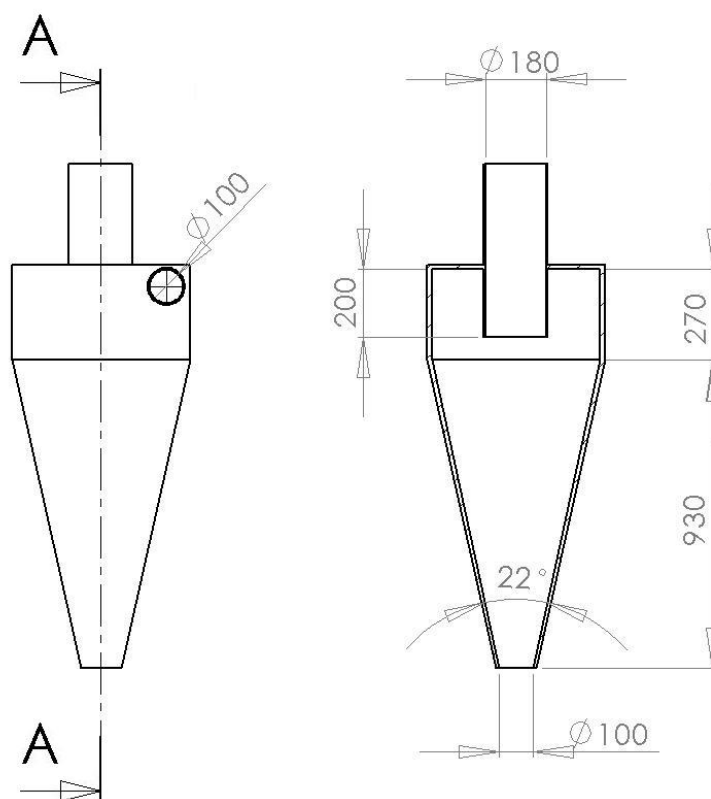
Obr. 5.13 Dělicí křivka při třídění křemičitého písku v hydrocyklonu

### 5.3 Provedení zkušební numerické simulace proudění v hydrocyklonu

Pro navržení optimálních rozměrů hydrocyklonu do zadané technologie bylo využito numerických simulací v programu ANSYS-CFX [16]. Při návrhu zařízení bylo vycházeno z dostupných odborných publikací řešících problematiku hydrocyklonů a proudění suspenzí v nich [17]. Jelikož je problematika hydrocyklonů značně komplikovaná a závislá na mnoha parametrech, bylo nutné celou úlohu zjednodušit, aby bylo dosaženo alespoň nějakého výsledku.

#### 5.3.1. Geometrie zkoumaného hydrocyklonu

Předmětem výpočtové analýzy je hydrocyklon, do kterého pod tlakem proudí suspenze požadovaného složení. Uvnitř separačního zařízení dochází k oddělení části suspenze do výtokové trysky a zbytek proudí horizontálně do přepadové trysky. Velikost průměru válcové části hydrocyklonu je 500 mm a úhel kónické části 22°. Průměry vstupní, přepadové a výtokové trysky byly měněny v závislosti na dosažených výsledcích. Na následujícím obrázku je znázorněna výchozí geometrie hydrocyklonu.



Obr. 5.14 Geometrie hydrocyklonu

### 5.3.2. Vlastnosti média a částic

Předpokládáno bylo, že do hydrocyklonu proudí suspenze za normální teploty  $25^\circ\text{C}$  pod tlakem v rozmezí od 1,1 do 2,5 bar. Přiváděná tekutina je složená z vody a vytěžených sedimentů. Suspenze obsahuje 7% hm. pevných částic. Granulometrické složení sedimentů částečně odpovídá měření provedeného v kap. 3.

Pro provedení numerické simulace hydrodynamické separace, bylo třeba v této fázi přistoupit k určitým zjednodušením. Sedimenty byly nahrazeny dvěma teoretickými složkami s různou hustotou a především odlišnou velikostí částic.

#### 1. písek

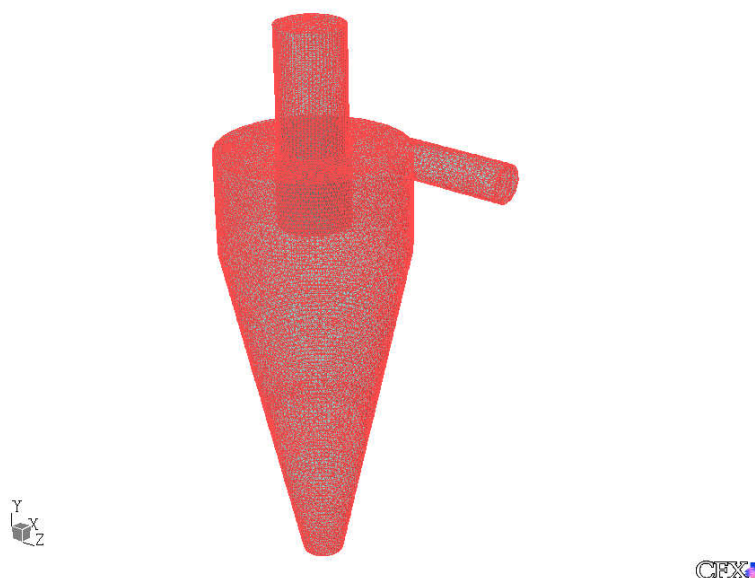
Složka obsahuje částice o velikosti 1,1 mm – 2,7 mm o měrné hmotnosti  $2200 \text{ kg/m}^3$

#### 2. prach

Složka obsahuje částice o velikosti 0,01 mm – 1,1 mm o měrné hmotnosti  $1800 \text{ kg/m}^3$

*Nastavení okrajových podmínek a simulace usazování částic v cyklonu + obr. modelu s okrajovými podmínkami*

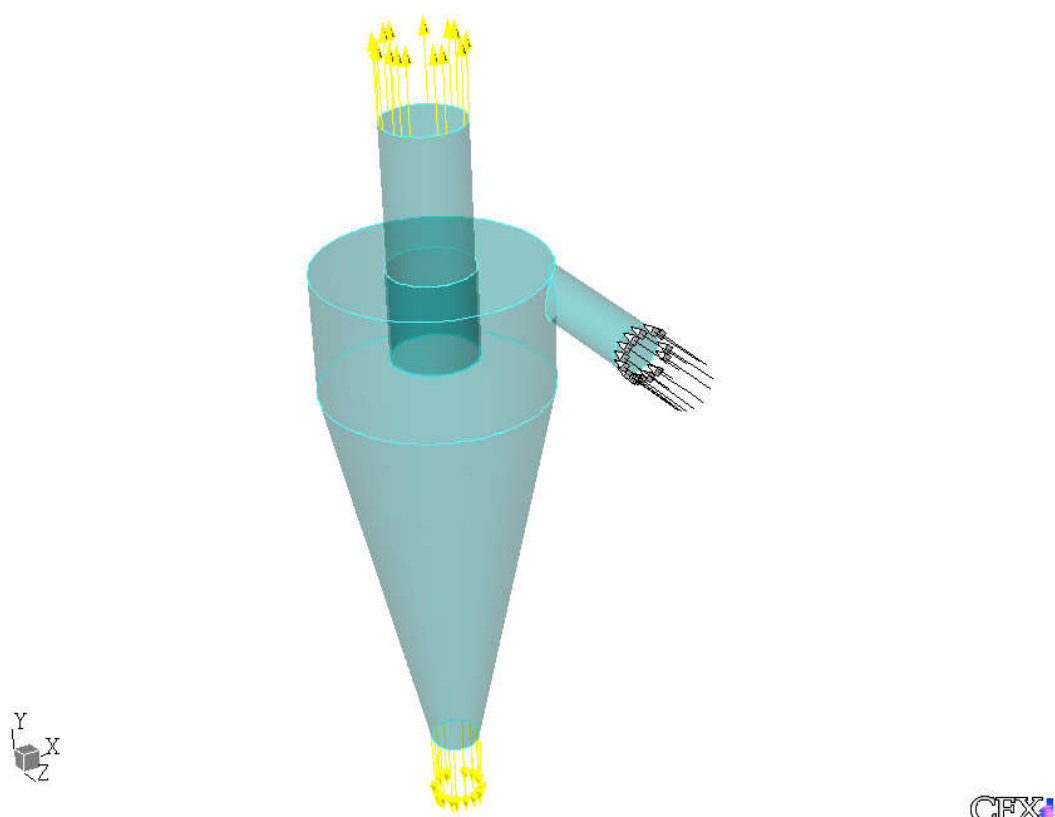
Výpočtové modely konkrétně navržených variant hydrocyklonu byly vytvářeny vždy shodně. Modely pro analýzy proudění se skládaly zhruba z 1,3 milionu tetraedrických elementů a zhruba 250 tisíce uzlů. Na Obr. 4.6 je možné vidět jednu z použitých výpočtových sítí hydrocyklonu včetně nátokové a přepadové trysky. Při tvorbě sítí nebyla opomenuta mezní vrstva, kterou představovaly prizmatické elementy.



*Obr. 5.15 Sít' výpočtového modelu pro CFD analýzu*

Jako okrajových podmínek při CFD analýzách bylo užito pracovního tlaku a průtoků suspenze v nátokové trysce hydrocyklonu (viz Obr. 4.7). Na výstupech byla ponechána volná podmínka pro dopočet požadovaných veličin tlaků a rychlostí ze vstupních hodnot (na Obr. 4.7 znázorněno žlutými šipkami). Dále byly zadány fyzikální vlastnosti částic obsažených v suspenzi. Vlastnosti vody proudící v hydrocyklonu byly brány z databáze výpočtového programu.

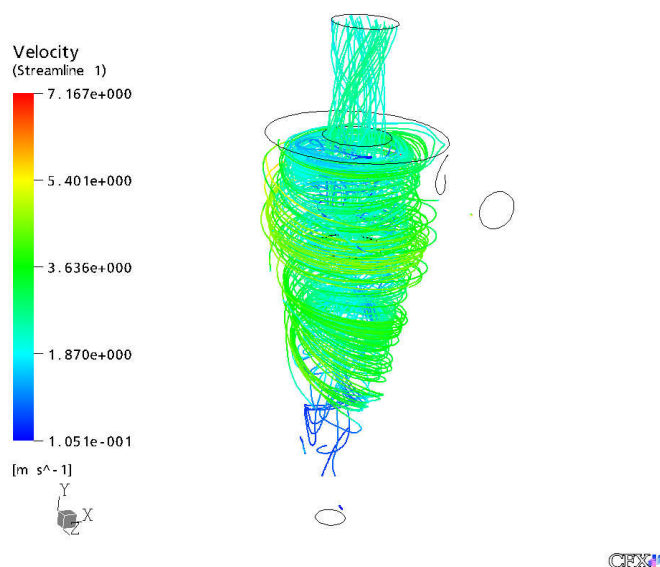
Co se týká nastavení simulací, tak bylo zadáno působení gravitačního pole a k usazování částic mělo docházet v důsledku rozdílné hustoty kapalného média a částic. Dále bylo nutné upřesnit okrajové podmínky na vstupní trysce. Byla zadána rychlost částic, která byla vždy rovna rychlosti suspenze na vstupu. Taktéž bylo nutné zadat hmotnostní průtok částic na vstupu, což bylo určeno z hmotnostního podílu pevné fáze a kapaliny. Na základě studia odborných publikací [17] bylo zjištěno, že nejvhodnějším modelem turbulence pro simulace usazování částic v hydrocyklonech je Reynolds Stress Model (RSM) a model Large Eddy Simulation (LES). Jelikož je druhý z modelů turbulence příliš náročný na výpočtový čas, byl při simulacích použit Reynoldsův model.



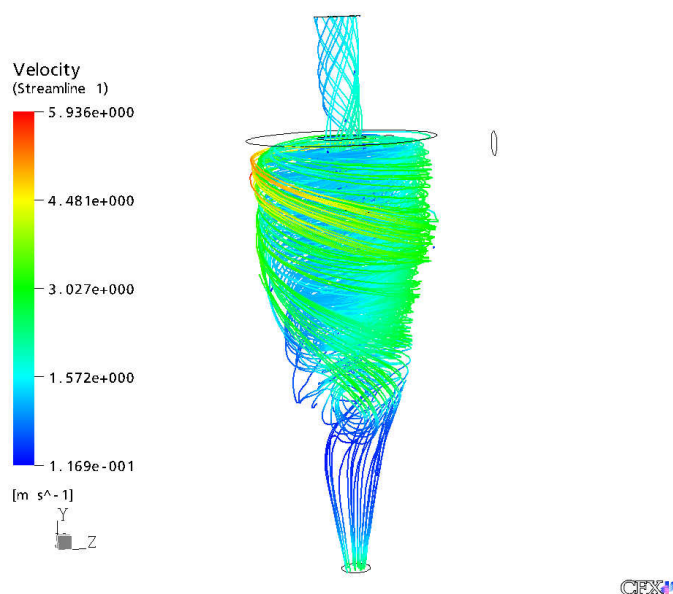
*Obr. 5.16 Znáznornění okrajových podmínek analýzy proudění*

### 5.3.3 Výsledky numerických simulací a jejich zhodnocení

Na počátku simulací byly postupně prováděny úpravy geometrie a fyzikálních vlastností vstupní suspenze tak, aby bylo nalezeno optimální řešení úlohy. Požadovaný vstupní průtok byl vzhledem k navrhované odvodňovací technologii a s přihlédnutím na výkon sacího bagru zvolen  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ . Bylo provedeno několik desítek simulací, z nichž však převážná část byla nevhodná a hydrocyklon neplnil svoji funkci správně (viz Obr. 5.17 a 5.18).



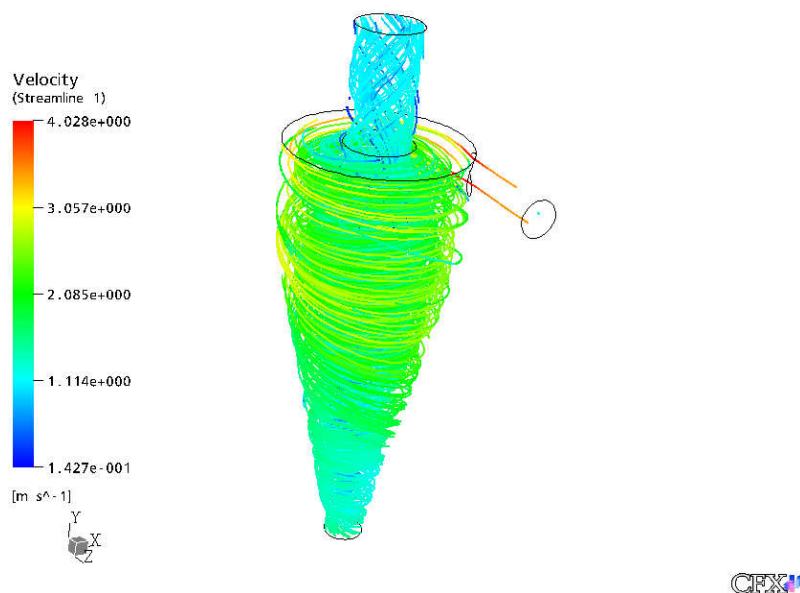
Obr. 5.17 Proudění suspenze jednoho z návrhů



Obr. 5.18 Proudění suspenze po snížení parametrů trysek hydrocyklonu

Jelikož změnou geometrie nedocházelo ke zlepšení proudění v hydrocyklonu, bylo nutné přistoupit ke změně provozních podmínek. Důkladnými analýzami bylo zjištěno, že zásadní vliv na charakteru proudění má množství přiváděné suspenze, proto tedy byl hledán přijatelný průtok. Optimalizací všech hlavních parametrů, bylo dosaženo výsledku zobrazeného na Obr. 5.19. Vstupní tlak byl upraven na 2,5 barů a průtok na 2 m<sup>3</sup>/min. Lze vidět, že proudění v hydrocyklonu probíhá velmi podobně teoretickému modelu.

Ke znázornění pohybu dispergovaných částic byla použita funkce Particle-track. Přes veškerou snahu však drobnější částice obsažené v suspenzi neopouštěly hydrocyklon přepadovou tryskou, ale společně s částicemi těžšími a objemnějšími směřovaly do trysky výtokové (Obr. 5.20.).



Obr. 5.19 Proudění suspenze v hydrocyklonu po optimalizaci vstupního proudu a geometrie



Obr. 5.20 Zobrazení dráhy pohybu obou simulovaných částic

Numerická simulace proudění suspenze a částic v hydrocyklonech je časově velice náročná. Každá drobná změna v geometrii nebo ve fyzikálních vlastnostech vstupní suspenze výrazně ovlivňuje získaný výsledek. Řešení této úlohy by vyžadovalo více času, což nebylo již možné.



	Size_(Micron)	Weight_fraction
1	40	0.1
2	80	0.29
3	110	0.08
4	160	0.13
5	200	0.11
6	400	0.11
7	800	0.07
8	1100	0.04
9	1400	0.02
10	2700	0.05

Obr. 5.22 Granulometrické složení vstupního proudu

Čerpadlo (7) představuje sací bagr, respektive jeho kalové čerpadlo. Výstupní tlak odpovídá přibližně tlaku generovaným v reálném sacím bagru.

Proud 2 prochází simulací potrubí mezi sacím bagrem a homogenizační nádrží. Jeho délka byla nastavena na 200 m a byly zadány i další upřesňující data. Tímto krokem se snažíme simulovat tlakové ztráty v potrubí. Proudící suspenze má stále stejné chemické a granulometrické složení a neuvažuje reálné změny vstupních parametrů. Homogenizační nádrž proto z výpočtu vynecháme. Přistoupíme tedy k čerpání suspenze pomocí čerpadla (8) do vstupní trysky hydrocyklonové baterie (2). Výstupní tlak z čerpadla byl nastaven na 2,5 bar stejně jako v případě numerické simulace v programu CFX.

Hydrocyklonová baterie se skládá ze čtyř hydrocyklonů s průměrem válcové části 500 mm. K tomuto řešení bylo nutné přistoupit vzhledem k velkému objemu čerpané suspenze. A tak místo jednoho Hydrocyklonu obřích rozměrů se použijí 4 menší, které budou zapojeny paralelně.

**Select Method:**

1 Bradley method (theoretical)

Alpha (v loss) 0.45

Exponent 0.8

**Select Mode:**

0 Rating: Calculate pressure drop & efficiency

Particle diameter 150 micron

Efficiency 0.8

Max. diameter m

Max. pressure drop Pa

Cyclone diameter 0.5 m

No. of cyclones 4

**Ratio of Cyclone Dimensions**

Inlet diameter 0.142857

Length 5

Overflow dia. 0.3

Underflow dia. 0.2

Cone angle deg. 25

Vol split ratio

**Calculated Results**

D50, microns 70.466

Efficiency 0.804705

Pressure drop 7564.9 Pa

ID: 2

Obr. 5.23 Nastavení primárního hydrocyklonu



V hydrocyklonové baterii dochází vlivem odstředivých sil k oddělování těžších částic, které putují do proudu 5. Neodstředěné částice spolu větším množstvím pracovního média odchází přepadovou tryskou hydrocyklonů a tvoří proud 6.

Pomocí čerpadla (5) vháněn je vháněn proud 5 do sekundární baterie hydrocyklonů (3) pod tlakem 1,7 bar. Průměr válcové části byl zvolen s přihlédnutím k charakteru vstupního proudu a účelu zařízení 300 mm.

Select Method: 1 Bradley method (theoretical)

Alpha (v loss) 0.45

Exponent 0.8

Select Mode: 0 Rating: Calculate pressure drop & efficiency

Particle diameter 120 micron

Efficiency 0.8

Max. diameter m

Max. pressure drop Pa

Cyclone diameter 0.3 m

No. of cyclones 2

Ratio of Cyclone Dimensions

Inlet diameter 0.142857

Length 5

Overflow dia. 0.2

Underflow dia. 0.15

Cone angle deg. 20

Vol split ratio

Calculated Results

D50, microns 56.4866

Efficiency 0.964827

Pressure drop 7561.33 Pa

ID: 3

Obr. 5.24 Nastavení sekundárního hydrocyklonu

Výtok z této baterie (3) je označen ve schématu technologie jako výstupní proud 8. Jeho granulometrické složení je uvedeno na obr. 5.22.

**Solid : Silicon Dioxide**

Stream No.	8
Size ( microns )	Weight fractions
40.00	0.00215
80.00	0.11740
110.00	0.09782
160.00	0.19743
200.00	0.17168
400.00	0.17168
800.00	0.09016
1100.00	0.05152
1400.00	0.02576
2700.00	0.06440

Obr. 5.25 Granulometrické složení sušiny v proudu 8

Je zřetelné, že tento výstup obsahuje převážně těžší prvky SiO<sub>2</sub>. Objem pevných částic v tomto výstupu je přibližně 72%.

Suspenze z přepadových trysek sekundární baterie je označena jako proud 9, který směřuje do směšovače (4). Směšovač má za úkol simulovat druhou homogenizační nádrž, která v technologii umožňuje přivedené proudy dostatečně homogenizovat před vstupem do dekantační odstředivky (1).

Za vstupní proud dekantační odstředivky (1) je považován proud 10. Rozměry odstředivky jsou zvoleny vzhledem k rozměrům dekantérů, které se používají v jiných průmyslových aplikacích s obdobnými nároky na objemové množství přiváděné suspenze. Otáčky odstředivky byly nastaveny na hodnotu  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Jelikož program ChamCAD neumožňuje lépe nastavit účinnost odstředivky a ta by odseparovala veškeré pevné částice, bylo zapotřebí navolit parametry tak, aby na výstupu obsahovala 50 % sušiny.

Proud 11 je odpadní voda z dekantační odstředivky, která se vypouští zpět do vodní nádrže. Proud 12 je odvodněné bahno. Jeho granulometrické složení je uvedeno na obr. 5.22. Jak bylo uvedeno výše je sušiny v tomto výstupním proudu 50%

**Solid : Silicon Dioxide**

Stream No.	12
Size ( microns )	Weight fractions
40.00	0.43977
80.00	0.54208
110.00	0.01812
160.00	0.00003
200.00	0.00000
400.00	0.00000
800.00	0.00000
1100.00	0.00000
1400.00	0.00000
2700.00	0.00000

*Obr. 5.26 Nastavení sekundárního hydrocyklonu*

Celková bilance všech proudů je uvedena v příloze diplomové práce. Výsledky výpočtů získaných z programu ChemCAD je nutné brát s velkou rezervou. Jedním z důvodů je velký počet zjednodušení při návrhu. Skutečné sedimenty na dnech vodních nádrží navíc obsahují velké procento organických složek, které na sebe vážou vlhkost a tím brání odstředivým silám při odvodňování. Určitým omezením je také to, že početní algoritmy programu ChemCAD jsou příliš obecné a nelze je v některých případech dostatečně upřesnit.

## 6 Závěr

Problematika zanášení vodních toků sedimenty a jejich odstraňování je v dnešní době stále velmi přehlížena. Svůj podíl na tom také má MŽP, které v roce 2001 zařadilo sedimenty mezi odpady. Až do počátku roku 2009, kdy byly provedeny potřebné legislativní úpravy, bylo nakládání s těmito látkami nedostatečně ošetřeno a nebyl vydán ani žádný metodický postup, jak v dané problematice jasně postupovat v souladu se zákonem. Schválené úpravy umožňují navrátit sedimenty z vodních nádrží a rybníků zpět na zemědělskou půdu.

V diplomové práci jsou popsány jednotlivé metody těžby rybníčního bahna. Největší prostor byl ponechán metodě těžby sacím bagrem, jelikož se zdá, že se v budoucnosti tato metoda vzhledem ke svým nesporným výhodám stane více využívanou.

Tato práce se proto pokouší o navržení odvodňovací technologie, která by přímo na mokrou metodu těžby navazovala. Z toho důvodu bylo provedeno hned několik měření týkající se vlastností sedimentů a jejich možností je strojně odvodnit. Bylo také provedeno měření odvoditelnosti na laboratorním hydrocyklonu s pozitivními výsledky. Jelikož ale shánění potřebné aparatury vyžadovalo velké časové i organizační úsilí, je v diplomové práci uveden i návrh takovéto laboratorní jednotky.

Při návrhu samotné technologie byly využity informace z dostupné literatury pojednávající o odstředivých separátorech a to i na aplikacích, které zdánlivě s danou problematikou nemají příliš společného.

Po stanovení a rozvržení technologie obecně bylo přistoupeno k návrhu hydrocyklonu za pomoci numerické simulace v programu CFX. Podařilo se dosáhnout určitých výsledků, které názorně ukázaly, jak v hydrocyklonu proudí odstředovaná suspenze. Všechny částice, které suspenze obsahovala, ovšem opouštěly zařízení pouze výtokovou tryskou. Výsledky simulací umožnili navrhnout geometrie primární hydrocyklonové baterie v technologii hydrodynamického odvodňování, která je též simulována v programu ChamCAD.

K detailnějšímu návrhu simulace je potřeba provést důkladné měření složení sedimentů ve vodních nádržích a rybnících. Správnou funkci a optimální složení technologie je nutno ověřit na poloprovozních zařízeních.

## Seznam použité literatury

- [1] *Sedimenty a jejich vlastnosti*. Odpady.ihned.cz 15. 05. 2007 [cit. 2009-01-01]. Dostupný z WWW: <[http://odpady.servis.ihned.cz/204-E00000\\_search-yes-sediment-bf](http://odpady.servis.ihned.cz/204-E00000_search-yes-sediment-bf)>
- [2] *Problematika nakládání se sedimenty III*. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Sborník referátů. 5. Listopadu 2008. 48 s.
- [3] BENEŠOVÁ, J. *Okolnosti a souvislosti zemědělského využití rybníčního sedimentu*. 2007.
- [4] VOJTĚCH, V. *Metodická příručka pro obnovu a odbahňování rybníků a předzdrží*. Výzkumný ústav vodohospodářství T. G. Masaryka. Praha 1997.
- [5] HORSKÁ, M. et al. *Sedimenty už nejsou odpady*. Odpady.ihned.cz 11. 03. 2009 [cit. 2009-01-01]. Dostupný z WWW: <[http://odpady.servis.ihned.cz/204-E00000\\_search-yes-sediment-bf](http://odpady.servis.ihned.cz/204-E00000_search-yes-sediment-bf)>
- [6] ANSORGE, L. *Využití sedimentů z rybníků a vodních nádrží v zemědělství*. Září 2003. 18 s.
- [7] MEDEK, J. *Hydraulické pochody*. 3. Vyd. Brno. VUT Brno, 2000. 339 s. ISBN 80-214-0563-5.
- [8] TUČEK, F., DOHÁNYOS, M. *Zahušťování a odvodňování kalů*. Laboratorní metody v technologii vody. 1997.
- [9] JANKOVIČ, L., HLAVAČKA, V. *Intenzifikačné faktory odšťeďovania kalov*. SAFEKO, spol. s r. o.
- [10] UHLÍŘ, P. *Kalová koncovka komunální ČOV*. První brněnská strojírna Velká Bíteš a.s.
- [11] *Hydroseparace uzavřených vodohospodářských okruhů průmyslových podniků*. Dům techniky ČSVTS Ostrava. Říjen 1986.
- [12] SEDLÁČEK, M., KOUBÍK, M. *Čištění odpadních vod a zpracování kalů s minerálním znečištěním*. Výzkumný ústav vodohospodářský ve státním zemědělském nakladatelství. Praha 1983
- [13] Dinter, F. et. al. *Hydromechanické procesy I*. Česká technika – nakladatelství ČVUT. Praha 2005.
- [14] Dinter, F. et. al. *Hydromechanické procesy II*. Česká technika – nakladatelství ČVUT. Praha 2005.
- [15] *Identifikace rizika*. Vodní a vzduchové hospodářství, Energetika Třinec a.s.

- [16] STATIE, E. et. al. *A Computational Study of Particle Separation in Hydrocyclones*. 2009. 9 s.
- [17] LEEUWNER, M. J., EKSTEEN. J. J. *Computational fluid dynamic modelling of two phase flow in a hydrocyclone*. 2009. 6 s.

## **Seznam příloh**

**Příloha č. 1** Výstupní data proudů simulace v programu ChemCAD

**Příloha č. 2** Výkresová dokumentace

**Příloha č. 3** Výsledky měření viskozity jsou uvedeny na CD